



TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Kemian ja materiaalitieteiden tiedekunta
Puunjalostustekniikan koulutusohjelma

Simo Zitting

UUNINKESTÄVÄT JOUSTOPAKKAUSMATERIAALIT LEIPOMOTUOTTEILLE

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin
tutkintoa varten Espoossa 30.12.2009.

Valvoja

Professori Jouni Paltakari

Ohjaaja

Filosofian maisteri Hanna Lehtonen



TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Kemian ja materiaalitieteiden tiedekunta
Koulutus-/tutkinto-ohjelma:
Puunjalostustekniikka

DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ

Tekijä

Simo Zitting

Diplomityön nimi

Uuninkestävät joustopakkausmateriaalit leipomotuotteille

Tiivistelmä

Tämän työn tarkoituksena oli kartoittaa saatavilla olevia uuninkestäviä joustopakkausmateriaaleja ja löytää sopiva ratkaisu pakkauskonseptiin, jossa esipaistettu leipomotuote paistetaan pakkauksessaan noin 220 °C lämpötilassa. Flow-pack -pakkaamisessa käytetään kuumasaumausta. Materiaalit, jotka eivät ole kuumasaumautuvia, tulee käsitellä kuumasaumautuvalla päällysteellä, minkä vuoksi työssä on tutkittu sekä ratamateriaaleja että niissä käytettäviä päällysteitä.

Pakkausmateriaalille pyrittiin määrittämään eri prosessivaiheiden asettamat vaatimukset. Löydettyjen materiaalien ulkonäköä ja tuntumaa, lujuutta eri olosuhteissa, barrierominaisuuksia, uuninkestävyyttä, ympäristöystävällisyyttä, painettavuutta sekä pakkauskoneajettavuutta vertailtiin. Tavoitteena oli karsia pois käyttötarkoitukseen soveltumattomat materiaalit. Karsimista varten määritettiin kriteerit, jotka etsityn materiaalin tulee täyttää.

Tutkimuksessa käytetyt ratamateriaalit olivat PET-muovi, sellofaani, tiivispaperi, MG-paperi, dispersiöpäällystetty paperi sekä PET-paperi -laminaatti. Näiden lisäksi tutkittiin kolmea erilaista kuumasaumauspäällystettä.

Tutkimuksen perusteella havaittiin, että käytetty pakkauskone ei sellaisenaan sovellu paperiratojen ajamiseen. Tästä huolimatta voitiin päätellä, että parhaiten suunniteltuun käyttöön soveltuva materiaali olisi tiivispaperi tai MG-paperi, jonka neliömassa on alueella 60-80 g/m². Neliömassa-alue on kompromissi materiaalin lujuuden ja jäykkyyden välillä. Parhaiten käyttöön soveltuva päällyste olisi dispersiöpäällystetyssä paperissa käytetty päällyste. Dispersiöpäällystetyt paperit soveltuvat sekä kierrätykseen että kompostointiin. Pakkauksen ikkuna voitaisiin halutessa valmistaa PET-muovista, mikä kuitenkin estää pakkauksen kompostoinnin.

Työn valvoja

Professori Jouni Paltakari

Työn ohjaaja

FM Hanna Lehtonen

Professuuri

Paperitekniikka

Koodi

Puu-21

Sivumäärä

125

Kieli

suomi

Avainsanat

Uuninkestävä, flow-pack, joustopakkaus, elintarvikepakkaus, leipomotuotteet

Päiväys

30.12.2009



HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Faculty of Chemistry and Materials
Sciences
Degree Programme: Forest Products
Technology

ABSTRACT OF MASTER'S THESIS

Author

Simo Zitting

Title of Thesis

Ovenable Flexible-Packaging Materials for Bakery Products

Abstract

The aim of this research was to find out available ovenable flexible-packaging materials and to find a suitable solution for a packaging concept. The concept is to bake pre-baked and packaged bakery products in the package in around 220 °C. The products are to be packed with flow-pack - packaging which uses heat-sealing. Materials that are not heat-sealable must be treated with heat-sealable coating. Therefore this research discusses both web materials and heat-sealable coatings used with them.

The requirements for the materials in different process phases were determined. The appearance and feeling, strength in different conditions, barrier properties, ovenability, environmental impact, printability as well as runnability in the packaging machine of the materials were compared. The aim was to eliminate unsuitable materials according to specified criteria that must be filled by the material.

The web materials used in this research were PET-film, cellophane, greaseproof paper, MG-paper, dispersion coated paper and PET-paper laminate. In addition to these three different heat-sealing coatings were studied.

During the research was noticed that the packaging machine used is not suited as such for using paper-based materials. In spite of that was concluded that the best materials for intended use are greaseproof paper and MG-paper in grammage range of 60-80 g/m². The grammage range is trade-off between the strength and stiffness of the material. The best coating for the purpose is the coating used in dispersion coated paper. Dispersion coated papers can be recycled and composted. A window in the package could be made of PET-film what however spoils the biodegradability of the package.

Supervisor

Professor Jouni Paltakari

Instructor

M.Sc. Hanna Lehtonen

Chair

Paper Technology

Chair code

Puu-21

Pages

125

Language

Finnish

Keywords

Ovenable, flow-pack, flexible packaging,
food packaging, bakery products

Date

30.12.2009

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Fazer Leipomot Oy:lle vuoden 2009 aikana.

Haluaisin kiittää Fazer Leipomoita mahdollisuudesta osallistua tähän mielenkiintoiseen projektiin ja Fazerin henkilökuntaa yhteistyöstä projektin aikana. Erityisesti suuri kiitos ohjaajalleni Hanna Lehtoselle sekä Joutsen Paino Oy:n Henry Espolle avusta ja hyvistä neuvoista projektin aikana.

Valvojana toiminutta professori Jouni Paltakaria haluaisin kiittää rakentavasta palautteesta ja valistuneista ohjeista työn suorittamisessa.

Lopuksi haluaisin kiittää äitiä ja isää hyvästä evästyksestä opintiellä sekä kihlatuani Miiaa tukena olemisesta opiskelujeni aikana.

Helsingissä 30. joulukuuta 2009



Simo Zitting

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	9
1.1	Työn tavoite	9
1.2	Suunniteltu konsepti.....	9
1.2.1	Yleistä	9
1.2.2	Tuotteet	10
1.2.3	Haasteet	10
1.3	Myyntipisteet	11
2	PAKKAUSMATERIAALIT	13
2.1	Leipomotuotteiden asettamat vaatimukset	13
2.1.1	Yleistä	13
2.1.2	Pakastaminen.....	14
2.2	Barrier-ominaisuudet.....	16
2.2.1	Yleistä	16
2.2.2	Kulkeutuminen.....	16
2.2.3	Huokoisuus.....	19
2.2.4	Ilmanläpäisevyys	20
2.2.5	Rasvankestävyys	20
2.2.6	Vedenimukyky.....	20
2.2.7	Kaasunläpäisevyys.....	21
2.2.8	Vesihöyrynläpäisevyys	22
2.2.9	Hapenläpäisevyys.....	23
2.3	Lämmönkesto	24
2.3.1	Paperi	24
2.3.2	Muovit	26
2.3.3	Liima-aineet	27
2.4	Elintarvikelainsäädäntö.....	28
2.4.1	Yleistä	28
2.4.2	Muovit	29
2.4.3	Kuitumateriaalit	30
2.4.4	Pinnoitteet	31
3	JOUSTOPAKKAUSTEN PAINAMINEN	32
3.1	Menetelmät	32
3.1.1	Yleistä	32
3.1.2	Fleksopaino	32
3.1.3	Syväpaino	33
3.2	Painovärit	33
4	PAKKAAMINEN	35
4.1	Yleistä	35
4.2	Flow-pack -koneen toiminta	35
4.2.1	Pysty-flow-pack.....	35

4.2.2	Vaaka-flow-pack.....	37
4.3	Saumaaminen	37
4.3.1	Pintaenergia	37
4.3.2	Viskositeetti	38
4.3.3	Adheesio	39
4.3.4	Saumautuvuus	42
4.3.5	Kuumasaumausaineet.....	44
5	TUOTTEEN PAISTAMINEN	45
6	ELINKAARITARKASTELU.....	48
6.1	Yleistä	48
6.2	Lainsäädäntö	51
7	KIRJALLISUUSOSAN YHTEENVETO	52
8	KOKEELLISEN OSAN JOHDANTO	56
8.1	Suoritus	56
8.2	Tehdyt tutkimukset.....	56
8.2.1	Höyrynmuodostuminen	56
8.2.2	Myymäläleipomoiden ja paistopisteiden uunien lämpötilat.....	56
8.2.3	Materiaalien esitutkimus	57
8.2.4	Vetolujuus, venymä ja murtotyö	57
8.2.5	Puhkaisulujuus	58
8.2.6	Ilmanläpäisevyys	58
8.2.7	Materiaalien tummuminen paistettaessa	58
8.2.8	Testaus pilot-mittakaavassa	59
8.2.9	Testaus tuotantomittakaavassa	59
9	KÄYTETYT MATERIAALIT	60
9.1	PET-muovi	60
9.2	Sellofaani.....	61
9.3	Paperi ja kuumasaumautuva päällyste	62
9.3.1	Tiivispaperi	62
9.3.2	MG-paperi	63
9.3.3	Kuumasaumauspäällyste	64
9.4	Dispersiopäällystetty paperi	64
9.5	PET-paperi -laminaatti	65
10	TUTKIMUSMENETELMÄT	66
10.1	Höyrynmuodostuminen	66
10.2	Myymäläleipomoiden ja paistopisteiden uunien lämpötilat.....	67
10.3	Materiaalien esitutkimus	69
10.4	Vetolujuus, venymä ja murtotyö	69
10.5	Puhkaisulujuus	70
10.6	Ilmanläpäisevyys	70

10.7	Materiaalien tummuminen paistettaessa	70
10.8	Testaus pilot-mittakaavassa	71
10.8.1	Esivalmistelut	71
10.8.2	Pakkausten valmistaminen	71
10.8.3	Paistaminen	72
10.9	Testaus tuotantomittakaavassa	72
10.9.1	Käsittely painokoneessa	72
10.9.2	Painatuksen laatu	74
10.9.3	Painoväriin muuttuminen paistettaessa	74
10.9.4	Päällysteen vaikutus materiaalin ilmanläpäisevyyteen	74
10.9.5	Koeajo pakkauskoneessa	75
11	TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU	76
11.1	Höyrynmuodostuminen	76
11.2	Myymäläleipomoiden ja paistopisteiden uunien lämpötilat	78
11.3	Materiaalien esitutkimus	79
11.3.1	Sellofaani	79
11.3.2	PET-muovi	79
11.3.3	Tiivispaperi	79
11.3.4	MG-paperi	79
11.3.5	Dispersiopäällystetty paperi	80
11.3.6	PET-paperi -laminaatti	80
11.3.7	Yhteenveto	80
11.4	Vetolujuus, venymä ja murtotyö	81
11.4.1	Tiivispaperi	81
11.4.2	MG-paperi	84
11.4.3	Dispersiopäällystetty paperi	87
11.4.4	Yhteenveto	90
11.5	Puhkaisulujuus	92
11.6	Ilmanläpäisevyys	94
11.7	Materiaalin tummuminen paistettaessa	95
11.8	Testaus pilot-mittakaavassa	98
11.8.1	Tiivispaperi ja päällyste 1	98
11.8.2	MG-paperi sekä päällyste 2 ja päällyste 3	99
11.8.3	Dispersiopäällystetty paperi	101
11.8.4	PET-paperi -laminaatti	101
11.9	Testaus tuotantomittakaavassa	102
11.9.1	Käsittely painokoneessa	102
11.9.2	Painatuksen laatu	103
11.9.3	Painoväriin muuttuminen paistettaessa	105
11.9.4	Päällysteen vaikutus materiaalin ilmanläpäisevyyteen	106
11.9.5	Koeajo pakkauskoneessa	107
12	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	109

13	JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSET	113
13.1	Kustannukset.....	113
13.2	Elintarvikekelpoisuus	113
13.3	Aika-lämpötilaindikaattorit.....	113
13.4	Uunitekniiikan kehitys	115
13.5	Tuotteiden kuivuminen pakastuksen aikana	116
13.6	Irrokeominaisuuksien lisääminen silikonilla	116
13.7	Tiivispaperi-paperi -laminaatti.....	117
14	PROJEKTIN HAASTEET	118

LÄHDELUETTELO

1 JOHDANTO

1.1 Työn tavoite

Tämän diplomityön tavoitteena on kartoittaa saatavilla olevia uuninkestäviä joustopakkausmateriaaleja ja löytää sopiva ratkaisu suunnitellussa konseptissa käytettäville tuotteille. Soveltuvuutta arvioidaan materiaalin lujuuden, barriero-minaisuuksien, painettavuuden, ulkonäön ja ympäristövaikutusten kannalta. Tavoitteena on löytää materiaaleja, joiden soveltuvuutta voidaan vertailla keskenään parhaan ratkaisun löytämiseksi.

1.2 Suunniteltu konsepti

1.2.1 Yleistä

Tällä hetkellä myymäläleipomoissa ja paistopisteissä tuoreutettavat tuotteet toimitetaan leipomolta esipaistettuina ja pakastettuina. Tuotteet on pakattu suuriin muovisäkkeihin tai pahvilaatikoihin. Myymäläleipomon tai paistopisteen henkilökunta asettelee tuotteet pellille uunissa paistamista varten. Paistamisen jälkeen tuotteet pakataan käsin ja asetetaan myytäväksi. Irtotuotteet myydään pakkaamattomina, jolloin asiakas pakkaa valitsemansa tuotteen poimimisen yhteydessä.

Suunnitellun konseptin mukaan esipaistetut ja pakastetut tuotteet ovat valmiiksi pakattuina myymäläleipomoon tai paistopisteeseen toimitettaessa. Pakatut tuotteet voidaan laittaa sellaisenaan uuniin ja uunin jälkeen myytäväksi. Konseptin tavoitteena on vähentää henkilökunnan työmäärää, kun tuotteita ei tarvitse pakata erikseen. Lisäksi tuotteiden hygieniä parantuu ja tuotteen mukana olevassa pakkauksessa voidaan antaa tietoja tuotteesta. Tuote olisi myös helppo nauttia suoraan pakkauksesta esimerkiksi eväänä tai välipalana. Kuluttajan kannalta henkilökunnan työmäärän vähentyminen näkyy tuotteen hinnassa.

Koska myymäläleipomossa paistetaan useita erilaisia tuotteita, on olennaista, että tuotteiden paistolämpötila olisi sama kaikille tuotteille. Erilaiset paistolämpötilat tekevät myymäläleipomon toiminnan hankalammaksi, koska uunia joudutaan tuotteiden välissä lämmittämään ja jäähdyttämään. Tämän vuoksi käytettävän pakkausmateriaalin tulisi kestää noin 220 °C lämpötila.

Konseptissa on myös mahdollisuus myydä asiakkaalle pakastettuja tuotteita, jotka hän paistaa itse kotona. Tällöin pakkaus voidaan laittaa uuniin sellaisenaan eikä leivinpaperia tarvita.

1.2.2 Tuotteet

Konseptissa käytettäviksi tuotteiksi on suunniteltu calzone-pizzaa, pikkupullia ja sekaleipää. Myöhemmin tuotevalikoimaa on tarkoitus laajentaa ja luoda konseptin ympärille tuoteperhe. Tuotteet, erityisesti pizzat ja pullat, sisältävät rasvaa, mikä tulee ottaa huomioon pakkausmateriaalissa. Tuotteiden säilymisaikatavoitteet ovat pakasteena yli kuusi kuukautta ja paistamisen jälkeen kaksi päivää. Tuotteet tullaan pakkaamaan käyttäen flow-pack -pakkausta.

1.2.3 Haasteet

Uusi konsepti asettaa materiaalille monenlaisia haasteita. Uuninkestäviä joustopakkausmateriaaleja ei ole yleisesti juurikaan saatavilla, jolloin materiaalin kehittäminen ja testaaminen pitää aloittaa vähäisin alkutiedoin. Taulukossa 1 on esitetty prosessivaiheet, niiden aiheuttamat rasitukset pakkausmateriaalille ja pakkaukselle sekä prosessivaiheisiin liittyviä haasteita.

Taulukko 1. Prosessivaiheet, pakkausmateriaaliin ja pakkaukseen kohdistuvat rasitukset sekä prosessivaiheiden aiheuttamat haasteet.

Vaihe	Rasitus	Haaste
Pakkaaminen	Veto Terävät taitokset pakkaus-koneessa	Kestääkö materiaali pakkausko-neessa?
Pakastaminen	Jäätyminen	Kestääkö materiaali pakkasta?
Kuljetus ja varastointi pa-kastettuna	Lämpötilan vaihtelut	Kuivuuko tuote pakkauksessaan?
(Sulatus)	Kosteuden tiivistyminen ulkopintaan	Kestääkö materiaali tiivistyvää kosteutta?
Paistaminen	Vesihöyry Lämpötila n. 220 °C	Kuinka poistetaan muodostuva vesihöyry? Kestääkö materiaali lämpötilan? Kestääkö painoväri lämpötilan? Kestävätkö saumat lämpötilan? Tarttuuko tuote materiaaliin? Siirtyykö materiaaleista makuja tai hajuja tuotteeseen? Onko materiaali edustavan nä-köinen uunin jälkeen?
Myynti ja käyttö	Kosteuden tiivistyminen sisäpintaan Rypistyminen Puhkeaminen Rasva	Kestääkö materiaali tiivistyvää kosteutta? Kuinka haurasta materiaali on paiston jälkeen? Kestääkö materiaali tuotteesta tulevaa rasvaa? Onko pakkaus helposti avattavis-sa?
Elinkaaren loppu	Kompostointi Poltto Jätteeneksi	Onko materiaali kompostoitava tai kierrätettävä?

1.3 Myyntipisteet

Myyntipisteet koostuvat myymäläleipomoista, paistopisteistä ja kaupan ulkopuo-lisista pisteistä. Myymäläleipomot ovat myymälöiden yhteydessä toimivia leipo-mopisteitä, joissa sekä leivotaan tuotteita alusta alkaen että paistetaan pakastet-tuja aihioita. Leivottavia tuotteita ovat esimerkiksi leivät ja sämpylät. Paistoaihiot ovat esimerkiksi monimutkaisempia tuotteita, joiden leipominen myymäläleipo-mossa ei olisi kannattavaa.

Myymälöiden paistopisteissä paistetaan pelkästään pakastettuja aihioita. Tällä hetkellä Fazer Leipomot toimii tavarantoimittajana paistopisteille, joten paisto-

pisteissä ei tuoda esille Fazer-tuotemerkkiä. Kaupan ulkopuoliset pisteet ovat esimerkiksi kivijalkaleipomoita ja -kahviloita.

2 PAKKAUSMATERIAALIT

2.1 Leipomotuotteiden asettamat vaatimukset

2.1.1 Yleistä

Pakkauksen sisällä olevan kosteuden siirtymän aiheuttamat haitat ovat vaikeampia torjua kuin pakkauksen ulkopuolisen kosteuden aiheuttamat haitat. Puolikuivilla valmisteilla, kuten leivillä, kosteuden siirtyminen aiheuttaa homehtumisriskiä, koska paikallinen kosteus voi nousta yli homeiden minimikosteuden. Kuiva-aineen lisääminen on tehokkain keino suojautua pakkauksen sisäisen kosteuden siirtymiseltä. Jos se ei ole mahdollista, voidaan käyttää paremmin vesihöyryä läpäisevää pakkausmateriaalia, mikä estää kosteuden kertymistä paikallisesti. /1, s. 48/.

Mikrobit ovat merkittävä elintarvikkeiden pilaantumista aiheuttava tekijä. Mikrobin toiminta on riippuvainen vedenaktiivisuudesta a_w . Vedenaktiivisuus kuvaa sen vapaan veden määrää, joka on käytettävissä mikrobin kasvuun. Vedenaktiivisuus on sitä pienempi, mitä enemmän kemiallisia aineita, kuten suoloja ja soke-ria, veteen on liuennut. /2, s. 10/.

Vedenaktiivisuus on elintarvikkeen sisältämän veden ja puhtaan veden höyrynpaineiden suhde

$$a_w = \frac{p}{p_0} \quad (1)$$

jossa p on elintarvikkeen sisältämän veden höyrynpaine
 p_0 on puhtaan veden höyrynpaine

Kuivattujen elintarvikkeiden optimaalinen kosteustasapaino on vedenaktiivisuusalueella 0,2-0,3. Tämän alueen ulkopuolella elintarvikkeissa tapahtuvat reaktiot alkavat nopeammin. Mikrobit eivät pysty kasvamaan elintarvikkeessa, jos sen vedenaktiivisuus on pienempi kuin mikrobin minimivedenaktiivisuus. Useimmat mikrobit vaativat vedenaktiivisuudeksi vähintään 0,90. Homeille ve-

denaktiivisuudeksi riittää 0,80 tai jopa 0,65. Vedenaktiivisuutta voidaan vähentää kuivaamalla elintarviketta tai lisäämällä siihen suolaa tai sokeria. /2, s. 12-13/.

Konditoria- ja leipomotuotteet tarvitsevat pakkausmateriaalilta rasvankestävyyttä. Leipomotuotteiden pakkauksilla tulisi olla myös alhainen vedenläpäisevyys. Kuuman leivän säilytyspakkauksen tulee pystyä poistamaan höyry, mutta samanaikaisesti olla riittävän ilmatiivis, jotta leipä ei kuivu. /3/.

2.1.2 Pakastaminen

Matalia lämpötiloja käytetään hidastamaan tai pysäyttämään mikro-organismien kasvu, hidastamaan kemiallisia reaktioita ja estämään entsyymien toiminta. Pakastaminen alle -18 °C:een vähentää merkittävästi elinkelpoisia organismeja elintarvikkeessa, mutta ei steriloi sitä. Pakastettaessa elintarvikkeen mikrobikasvu hidastuu ja vapaan veden määrä vähenee. /4, s.207-208/.

Elintarvikkeiden jäätymisnopeus on riippuvainen monista tekijöistä, kuten jäädytyslämpötilasta ja -menetelmästä, ilmankierrosta, pakkauksen koosta ja muodosta sekä pakastettavasta elintarvikkeesta. Kiteiden muodostuminen on voimakainta lämpötilassa 0-5 °C, jolloin jäänmuodostuminen tapahtuu pääasiassa solunesteessä. Jäätymistä rajoittaa veteen liuenneiden aineiden aiheuttama jäätympisteiden alenema. Jään lisääntyessä solujen sisällä liuenneiden suolojen konsentraatio jäätymättömässä nesteessä kasvaa ympäristöään suuremmaksi. Tämä aiheuttaa osmoosin, joka johtaa nestettä pois solusta. Mitä hitaampi jäätyminen, sitä suurempi määrä nestettä poistuu, mikä voi johtaa solun vääristymiseen ja entsyymikäyttytymisen muuttumiseen. Tämä voi johtaa liialliseen nesteen erottumiseen sulatuksessa sekä muutoksiin elintarvikkeen tunteissa ja maussa. Tämän vuoksi pakastaminen pyritään suorittamaan nopeasti. Liian nopea pakastaminen esimerkiksi nestemäisellä typellä voi aiheuttaa rasituksia, mikä voi johtaa herkkien tuotteiden hajoamiseen. /4, s.208-209/.

Jäädytetyn elintarvikkeen pakkauksen tulee täyttää seuraavat vaatimukset /4, s.209/:

- Pakkauksen tulee kestää matalia lämpötiloja
- Pakkauksen tulee olla myrkytön
- Pakkauksesta ei saa siirtyä hajua tai makua elintarvikkeeseen
- Pakkauksella tulee olla riittävä vesihöyrybarrier
- Pakkauksen tulee kestää kosteutta
- Pakkauksen tulee olla käsiteltävissä automaattisilla pakkauskoneilla
- Sitä tulee pystyä painamaan
- Sen pitää olla suojattu peukaloinnilta

Jotta tuote pysyisi eriomaaisessa kunnossa varastoinnin ja jakelun aikana, pakkausten tulee suojata tuotetta seuraavilta rasituksilta /4, s.209/:

- **Kuivuminen.** Lämpötilavaihteluiden vuoksi voi kehittyä vesihöyryä, joka vuotaa pakkauksesta materiaalin läpi tai saumojen kautta. Tämä kosteuden poistuminen kuivattaa pakastetun elintarvikkeen pintaa. Pintakerros voi olla ohut, mutta se voi haitata tuotteen ulkonäköä ja myytävyyttä.
- **Hapettuminen.** Entsyymit, joita ei ole poistettu, voivat aiheuttaa hapettumista, jos pakkaukseen pääsee ilmaa.
- **Valo.** Valo kiihdyttää erityisesti rasvapitoisten elintarvikkeiden hapettumista. Lämpö voi aiheuttaa lisääntyntä entsyymitoimintaa ja yleistä kemiallista ja bakteerisyntyistä pilaantumista.
- **Maun ja hajun muuttuminen.** Ilmassa olevien hajujen tarttuminen jäiseen elintarvikkeeseen on epätodennäköistä. Haihtuvien yhdisteiden poistuminen esikypsennetyistä elintarvikkeista voi aiheuttaa maun heikkenemistä.
- **Fyysiset vauriot.** Vaurioita voi syntyä puristumisesta varastoinnin ja kuljetuksen aikana. Erityisesti laatikon pohjalla oleviin tuotteisiin voi kohdistua suuria rasituksia jos laatikkoa kolhitaan tai tiputellaan.

Yleisesti pakastetut elintarvikkeet eivät tarvitse ilmatiivistä pakkausta, koska niiden säilyminen on matalan lämpötilan vastuulla. Joissain tapauksissa tarvitaan kuitenkin kosteus- ja ilmabarrieria tai vuotamisen estämistä sulatuksessa. Kuivumisen aiheuttaman massan pientymisen ohella jään erottumista voi tapahtua vajaatäytetyissä pakkauksissa. Jään erottuminen johtuu veden sublimoitumisesta tuotteesta pakkauksen sisällä vaihtelevassa pakastuslämpötilassa. /4, s.209-210/. Suunnitellussa konseptissa käytettävän pakkausmateriaalin vesihöyrybarrier voi olla pieni, koska tuotteita ei ole tarkoitus varastoida pakkasessa sellaisenaan vaan sekundääripakkauksessa, joka on muovipussilla vuorattu pah-

vilaatikko. Sekundääripakkaus estää tuotteista sublimoituvan kosteuden poistumisen ja tuotteiden kuivumisen jatkumisen.

2.2 Barrier-ominaisuudet

2.2.1 Yleistä

Barrier tarkoittaa materiaalin kykyä estää aineiden kulkeutumista itsensä läpi. Materiaalin barrier-kyky on riippuvainen läpäisevästä aineesta. /5, s.298/. Barrierien tehtävänä on estää seuraavien asioiden pääsy pakkaukseen tai poistuminen pakkauksesta /4, s.296/:

- Kaasut (hiilidioksidi, happi, rikkidioksidi ja typpi)
- Höyryt (vesihöyry)
- Hajut (aromiaineet ja eteeriset öljyt)
- Vesi ja alkoholi
- Öljyt ja rasvat
- Pöly ja hiekka
- Home ja bakteerit
- Hyönteiset ja jyrsijät
- Valo ja muu säteily

Koska mikään pakkaus ei ole täydellisen tiivis, pakkausta voidaan pitää teknisesti tiiviinä, kun tietyn aineen kulkeutumisnopeus pakkausmateriaalin läpi on niin pieni, ettei se aiheuta haittaa pakkaukselle tai sen sisältämälle elintarvikkeelle. /2, s. 21/.

2.2.2 Kulkeutuminen

Nopeus, jolla kaasu tai höyry kulkeutuu läpäisevän kalvon läpi, on riippuvainen useista tekijöistä, kuten kalvon ominaisuuksista, kaasun tai höyryn ominaisuuksista sekä kaasun ja kalvon välisestä keskinäisestä vaikutuksesta. Materiaali voidaan kuvata koostuvan erillisistä partikkeleista, jotka ovat pakkautuneet yhteen eri tavoin. Pakkautuminen ei ole koskaan täydellistä, vaan partikkeleiden väliin jää huokosia, joiden koko riippuu käytetystä materiaalista. Syntyneen verkoston lujuus riippuu atomien tai molekyylien värähtelystä sekä tietyn kokoisten huokosten määrästä, millä on oma osuutensa värähtelyn määrään. Lujempi verkosto

voi aiheuttaa selektiivisen läpäisyn, jolloin vain pienet molekyylit pääsevät läpäisemään verkoston, kun taas joustavampi verkosto läpäisee suurempia molekyylejä, mikä johtuu huokosta ympäröivien atomien suuremmasta siirtymästä. /4, s.298/.

Orgaanisissa polymeereissä voidaan havaita neljänlaisia huokosia /4, s.299/:

- Makroskooppisia ja mikroskooppisia halkeamia
- Submikroskooppisia kapillaareja ja kanavoita
- Molekyylien välisiä aukkoja
- Molekyylin sisäisiä aukkoja

Materiaalit voivat kulkeutua polymeerikalvoissa joko diffundoitumalla aineen läpi tai virtaamalla aukkojen ja huokosten kautta. Virtaus aukkojen kautta voi olla paljon suurempi kuin diffundoituminen. /6/.

Kaasun kulkeutumiseen polymeerimateriaalissa riippuu polymeerin molekyyli-massasta, molekyylien koosta ja läpäisevän aineen kemiallisista ominaisuuksista. Barrierpäällystetyssä paperissa nestemäisen veden ja vesihöyryn läpäisy pienee eksponentiaalisesti päällystekerroksen kasvaessa. Kaikkien aineiden kulkeutumisnopeudet ovat riippuvaisia lämpötilasta. Parempi barrier saavutetaan matalissa lämpötiloissa, jolloin molekyyliverkosto värähtelee vähemmän päästäen vähemmän ainetta läpi. Hapen kulkeutuminen vähentyy päällystekerroksen kasvaessa, mikä johtuu materiaalissa olevien aukkojen sulkeutumisesta. /6/.

Pysyvässä olotilassa kaasun kulkeutumiseen pätee Fickin diffuusiolaki /4, s.299-300/:

$$Q = -\frac{AtD}{l} \frac{dc}{dx}, \quad (2)$$

jossa	Q	on	kulkeutuneen kaasun määrä
	A	on	kalvon pinta-ala
	t	on	kulkeutumisaika
	D	on	diffuusiovakio
	$\frac{dc}{dx}$	on	konsentraatigradientti
	l	on	kalvon paksuus

Tämä yhtälö voidaan integroida D:n ollessa konsentraatiosta riippumaton, jolloin saadaan

$$Q = \frac{AtD}{l} (c_1 - c_2), \quad (3)$$

jossa c_1 ja c_2 ovat kaasun konsentraatiot eri puolilla kalvoa. Konsentraatiot voidaan ilmoittaa paineina Henryn lain mukaisesti:

$$Q = \frac{At}{l} DS(p_1 - p_2), \quad (4)$$

jossa S on kaasun liukoisuuskerroin kalvoon.

Tästä saadaan

$$P = DS = \frac{lQ}{AT(p_1 - p_2)}, \quad (5)$$

jossa P on läpäisevyysvakio.

Tämä käsittely perustuu oletukseen, että D ja S ovat riippumattomia konsentraatiosta ja pätee kaasuille, jotka noudattavat kaasulakeja, kuten hapelle, typelle ja vedylle. Kaasuille, joiden käyttäytyminen poikkeaa kaasulakeista vain vähän, teoria pätee suhteellisen hyvin. Kaasuille, joiden keskinäinen vaikutus kalvon kanssa on merkittävä, teoria ei enää päde. Tällaisia kaasuja ovat esimerkiksi vesihöyry ja monet orgaaniset aineet.

Ennen pysyvää olotilaa on vaihe, jossa läpäisevyys lisääntyy. Tätä tilannetta voidaan kuvata Fickin lain toisella muodolla /4, s.300/:

$$\frac{dc}{dt} = D \frac{d^2c}{dx^2}. \quad (6)$$

Yhtälölle ei ole löydetty yleistä ratkaisua, mutta sille voidaan tietyssä tilanteessa kehittää yksittäisratkaisu.

Laminoitujen ja päällystettyjen materiaalien voidaan ajatella olevan peräkkäisiä kalvoja. Esimerkiksi kaksikerroksiselle laminaatille pätee yhtälö /4, s.308/:

$$\frac{1}{P_{lam}} = \frac{x_1}{L} \cdot \frac{1}{P_1} + \frac{x_2}{L} \cdot \frac{1}{P_2}, \quad (7)$$

jossa	P_{lam}	on	laminaatin läpäisevyysvakio
	x_1	on	ensimmäisen kerroksen paksuus
	x_2	on	toisen kerroksen paksuus
	L	on	laminaatin paksuus x_1+x_2
	P_1	on	ensimmäisen kerroksen läpäisevyysvakio
	P_2	on	toisen kerroksen läpäisevyysvakio

Yhtälö pätee, jos kumpikaan kerros ei vaikuta kaasun kanssa. Jos näin tapahtuu, yhteys ei ole enää additiivinen. Tarkasteltaessa päällystettyä tai laminoitua paperia paperi muodostaa yhden yhtälössä 7 esitetyn kerroksen.

2.2.3 Huokoisuus

Huokoisuus kuvaa sellaista materiaalia, jossa on reikiä. Huokoisuus on huokosten tilavuuden suhde materiaalin kokonaistilavuuteen. /7/. Paperimateriaaleja käytettäessä huokoisuus on merkittävä tekijä, kun halutaan saavuttaa hyvät barrierominaisuudet dispersiopäällysteillä. Huokoisuus vaikuttaa muun muassa päällysteen absorptiovastukseen ja sorptiokäyttäytymiseen. Nämä ominaisuudet ovat merkittäviä, kun paperia päällystetään vesipohjaisella päällysteellä. /3/.

2.2.4 Ilmanläpäisevyys

Ilmanläpäisevyys on yleinen epäsuora keino kuvata materiaalin huokosrakennetta. Tiivispaperin valmistuksessa sitä käytetään ennustamaan paperin barrierominaisuuksia. Menetelmää käytetään, koska se on nopeampi kuin varsinaiset barriertestit. Tiivispaperin ilmanläpäisevyys on standardin SCAN-P mukaan määritetty /8, s. 6-8/:

$$S = \frac{\bar{u}}{A\Delta p} \quad (8)$$

jossa	S	on	ilmanläpäisevyys (m/Pa·s)
	\bar{u}	on	keskimääräinen ilmavirta (m ³ /s)
	A	on	paperinäytteen pinta-ala (m ²)
	Δp	on	ilmanpaine-ero arkin eri puolilla (Pa)

2.2.5 Rasvankestävyys

Materiaalin rasvankestävyys on seurausta huokosten puuttumisesta. Esimerkiksi voimakkaasti jauhetusta massasta valmistetun rasvatiiviin paperin huokokset ovat pieniä ja niiden huokoskoon jakauma on kapea. Suurimpien huokosten koolla ja huokosten kokojakaumalla on suhteellisen suuri korrelaatio. Suurimpien huokosten koko määrää rasvankestävyyden ja huokosten kokojakauma määrää ilmanläpäisevyyden. Rasvan läpäisyajan logaritmin ja ilmanläpäisevyyden logaritmin välillä on lineaarinen korrelaatio. /8, s. 8-9/.

2.2.6 Vedenimukyky

Materiaalin vedenimukyky on merkittävässä roolissa, kun materiaalia päällystetään vesipohjaisella päällysteellä. Kun vesipohjainen päällyste levitetään esimerkiksi paperille, on tärkeää, että päällyste pysyy paperin pinnassa eikä imeydy paperiin. Veden imeytyminen paperiin on selitetty kapillaarisella kulkeutumisella. Imeytymistä kuvaa Lucas-Washburn -yhtälö /8, s. 9-10/:

$$h^2 = \frac{r\gamma \cos \theta}{2\eta} t \quad (9)$$

jossa	h	on	kuljettu matka
	r	on	kapillaarinen säde
	γ	on	nesteen pintajännitys
	θ	on	nesteen ja kapillaariseinän välinen kontaktikulma
	η	on	nesteen viskositeetti
	t	on	imeytymisaika

Todellisuudessa veden imeytyminen paperiin on monimutkaisempaa kuitujen paisumisen vuoksi. Muita mekanismeja veden kulkeutumiselle paperissa ovat /8, s. 10/

- höyryn diffuusiokulkeutuminen huokosissa
- nesteen kapillaarinen kulkeutuminen huokosissa
- pintadiffuusio huokosissa
- nesteen liikkuminen kuitujen sisällä

Nollapaineessa kapillaarinen läpäisy edellyttää, että neste kastelee pinnan /9/. Kastuminen tapahtuu, kun nesteen ja pinnan välinen kontaktikulma on alle 90°. Prosesseissa, kuten päällystyksessä tai painatuksessa, joissa nesteen siirtyminen tapahtuu nipissä, pintaa vasten puristettu neste kastelee aina pinnan. /8, s. 10/.

2.2.7 Kaasunläpäisevyys

Kaasun kulkeutuminen polymeerisen barriermateriaalin läpi tapahtuu kolmessa vaiheessa. Ensin kaasumolekyylit adsorboituvat materiaalin pintaan, mistä ne liukenevat polymeeriverkkoon. Sitten partikkelit diffundoituvat polymeerin läpi toiselle puolelle, jossa kaasun konsentraatio on pienempi tai osapaine matalampi. Diffuusio voidaan käsittää diffundoituvan aineen siirtymisenä polymeerin huokosesta toiseen. Lopuksi kaasumolekyylit desorboituvat barriermateriaalin toiselta pinnalta. /8, s. 11/.

Vesihöyrynläpäisevyys ja muiden kaasujen läpäisevyys asettavat usein ristiriitaisia vaatimuksia materiaalille. Molemmissa tapauksissa vaaditaan kuitenkin joitakin perusominaisuuksia. Polymeerillä, jonka *lasittumislämpötila* on korkea, loh-

kojen liikkuminen on vähäistä, polymeeriverkossa on vähemmän aukkoja ja sen rakenne on monimutkaisempi. Lisäksi polymeeriketjujen suuri lujuus ja pakkautuneisuus lisäävät polymeerin kiteisyyttä ja siten vähentää läpäisevyyttä. Myös ketjujen välinen sitoutuminen vähentää niiden liikkuvuutta ja siten estää paremmin kulkeutumista. Inerttisyys läpäisevälle aineelle on tärkeä ominaisuus. Polymeerin absorboima kosteus pehmentää sitä, mikä madaltaa lasittumislämpötilaa kasvattaen läpäisevyyttä. /8, s. 11/.

2.2.8 Vesihöyrynläpäisevyys

Kosteus aiheuttaa monia ei toivottuja reaktioita, jotka lyhentävät elintarvikkeen säilymisaikaa. Tällaisia reaktioita ovat esimerkiksi itsehapettuminen, vitamiinien hajoaminen sekä entsyymien ja mikrobien reaktiot. Lisäksi kosteus vaikuttaa joidenkin elintarvikkeiden koostumukseen ja rapeuteen. Tämän vuoksi matala vesihöyrynläpäisevyys (WVTR, water vapor transfer rate) on haluttu ominaisuus pakkausmateriaalissa. /8, s. 11-12/.

Ilmanläpäisevyyden vaikutusta vesihöyrynläpäisevyyteen avoimilla paperilajeilla, kuten LWC-paperilla, lainerilla, säkkipaperilla, kartongilla, sanomalehtipaperilla, suodatinpaperilla ja kirjoituspaperilla, on tutkittu. Tutkimuksen perusteella näiden paperilajien vesihöyrynläpäisevyys johtuu pääasiassa kaasun diffundoitumisesta huokosten kautta. /8, s. 12/.

Vesihöyry ei käyttäydy kuten muut kaasut, esimerkiksi ilma. Kaasun virtausnopeuden paperin läpi on kääntäen verrannollinen kaasun molekyylimassan neliöjuureen. Selluloosan hydroksyyli-ryhmät adsorboivat voimakkaasti vesihöyryä, mistä johtuvan pintadiffuusion vuoksi vesihöyry kulkeutuu paperin läpi nopeammin kuin on ennustettu. /8, s. 12/.

Ilmatiiviiden papereiden, kuten rasvankestävän paperin, vesihöyrynläpäisevyys johtuu sekä diffundoitumisesta huokosten kautta että pintadiffuusiosta. Vaikka tiivispaperin vesihöyrynläpäisevyys on pienempi kuin avointen paperilajien, se ei silti ole riittävä käytettäväksi pakkausmateriaalina suojaamaan tuotetta vesi-

höyryltä. Tiivispaperi voidaan päällystää dispersiopäällysteellä, mikä lisää paperin vesihöyrybarrieria. Tavallinen päällystemäärä on 4-15 g/m² /3/. Päällystettä pitää olla vähintään 3-5 g/m², jotta saavutetaan riittävä vesihöyrybarrier /8, s. 12/.

2.2.9 Hapenläpäisevyys

Vähäinen hapen kulkeutuminen on yksi tärkeimmistä elintarvikepakkausmateriaalin ominaisuuksista /4, s. 296/. Jos paljon happea pääsee pakkausmateriaalin läpi, elintarvikkeessa voi muodostua hapettavia reaktioita, jotka hajottavat lipidejä ja ravintoaineita, mikä johtaa pilaantumiseen. Lisäksi elintarvikkeessa olevat mikro-organismit voivat alkaa kasvamaan tietyssä happipitoisuudessa. /8, s. 13/.

Vähäisestä huokoisuudesta huolimatta tiivispaperi on huono happibarrier. Aukot ovat merkittävän tekijä hapen kulkeutumisessa barriermateriaalien läpi /6/. Hapen läpäisemisen estäminen vaatii barrierpäällysteen, joka voi olla polyeeteeniä, styreeni-akrylaattia tai styreeni-butadieeniä. /8, s. 13/.

Elintarvikkeiden pakkaamisessa happibarrierina käytetään useimmiten etyyli-vinyylialkoholi -kopolymeerejä (EVOH), polyestereitä, polyamideja ja alumiinia /10/. Barriermateriaalin kiteytyneisyys on merkittävä tekijä, koska kiteet ovat yleensä läpäisemättömiä ja ne lisäävät rakenteen monimutkaisuutta /11/. Kiteisyyden lisäksi polaarisuus on tärkeää hapenläpäisevyyden kannalta. Suurempi polaarisuus aiheuttaa matalamman hapenläpäisevyyden /8, s. 13/.

Pakkausmateriaalin hapenläpäisevyys on riippuvainen lämpötilasta. Hapenläpäisevyys kasvaa lämpötilan kasvaessa. Pakkausmateriaalikustannusten pienentämiseksi ja vaaditun säilyvyyden saavuttamiseksi pakkausmateriaalien hapenläpäisevyys tulisi mitata käyttöolosuhteita vastaavassa lämpötilassa ja ilmankosteudessa. /12/. Tässä työssä ilmiötä voidaan hyödyntää pakastusvaiheessa, jolloin matalassa lämpötilassa pakkausmateriaalin hapenläpäisevyys on pienempi kuin huoneenlämmössä.

2.3 Lämmönkesto

2.3.1 Paperi

Selluloosan terminen hajoaminen tapahtuu kahdenlaisten reaktioiden kautta: (1) vaiheittainen hajoaminen ja hiiltyminen matalassa lämpötilassa ja (2) nopea palaminen korkeassa lämpötilassa, minkä seurauksena syntyy orgaanisia yhdisteitä. Matalissa lämpötiloissa ($< 200\text{ °C}$) ei voida määrittää selvää rajaa selluloosan lämpöhajoamisen ja lämpökiihdytetyn ikääntymisen välillä. Happi ja vesi vaikuttavat merkittävästi selluloosamateriaalien hajoamiseen. Lämpöhajoaminen ilman tai hapen vaikutuksesta johtuu pääasiassa hapettumisreaktioista. Näiden reaktioiden tuotteena syntyy oksiselluloosaa, joka hajoaa edelleen lämmitettäessä vedeksi, hiilidioksidiksi ja hiilimonoksidiksi. /13, s. 23-24/.

Matala lämpötila aiheuttaa myös suuria muutoksia polymerisoitumisasteeseen. Hapen vaikutuksesta pitkän ajan kuluessa polymerisoitumisaste laskee ja tasaantuu arvoon 200, mikä vastaa hienokiteistä selluloosaa. Polymerisoitumisasteen lasku tapahtuu alueella $150\text{--}190\text{ °C}$ /14, s. 410/. Lisäksi selluloosaketjuun syntyy karbonyyli- ja karboksyyli-ryhmiä. Myös typpi laskee selluloosan polymerisoitumisastetta, mutta lasku tapahtuu paljon hitaammin. /13, s. 24/.

Selluloosan nopea pyrolyysi tapahtuu yli 250 °C lämpötiloissa synnyttäen levoglukosaania ja sen hajoamistuotteita, kuten puuhiiltä, tervaa ja haihtuvia yhdisteitä. Tämä reaktio on tärkeä, kun poltetaan selluloosamateriaaleja, koska se tuottaa palamista edistävää kaasumaista polttoainetta. Selluloosamateriaalin tulenkestoa voidaan parantaa rajoittamalla reaktiossa muodostuvan levoglukoosanin ja muiden palavien yhdisteiden syntymistä. /13, s. 24/.

Lämpö ja kosteus aiheuttavat kuiduissa kemiallisia, optisia ja morfologisia muutoksia. 180 °C :ssa voidaan havaita kuitujen pinnan kutistumista ja kuitujen välisen rakenteen väljentymistä. 200 °C :ssa kuituihin syntyy murtumia ja rikkoontuneiden kuitujen määrä kasvaa. 230 °C :ssa voidaan havaita kuitujen pintakerrosten poikittaista kuoriutumista. Tutkittaessa GW- (groundwood, hioke) ja TMP-

massoista (thermomechanical pulp, kuumahierre) valmistettuja arkkeja havaittiin, että lämpötiloissa 180 °C ja 200 °C arkkien vaaleus laski useita yksiköitä vain muutaman minuutin jälkeen. Kuitujen käsittely korkean lämpötilan alueella (130-240 °C) on erittäin haitallista kuitujen ominaisuuksille aiheuttaen voimakasta mekaanista hajoamista ja värjäytymistä. /15, s. 197-202/.

Paperin värin muuttumista lämmön vaikutuksesta on tutkittu laajasti, mutta syntyvistä keltaisista yhdisteistä tiedetään hyvin vähän. Hiilihydraattien hydrolyysi oligomeerisiksi ja monomeerisiksi yhdisteiksi on osa kellastumisprosessia. Hydrolyysin happamassa aineessa tiedetään tuottavan furaaniyhdisteitä: furfuraalia pentosaaneista ja hydroksimetyylifurfuraalia selluloosasta. Näillä yhdisteillä on taipumus tiivistyä ja muodostaa tummaa ainetta, mikä saattaa olla syynä paperin värin muuttumiseen. /16, s. 723/.

Paperin tummuminen johtunee osaltaan myös hemiselluloosan hajoamisesta. Hemiselluloosakomponenttien hajoaminen alkaa noin 225 °C lämpötilassa ja hajoaminen on tapahtunut 325 °C lämpötilaan mennessä. Selluloosapolymeeri on vakaampi. Sen hajoaminen alkaa 370 °C lämpötilassa ja tapahtuu kapealla lämpötila-alueella. Ligniinin hajoaminen alkaa 200 °C lämpötilassa, mutta se kestää korkeita lämpötiloja paremmin kuin hiilihydraattipolymeerit. /17, s. 123/.

Polymeereillä, kuten selluloosalla, tapahtuu niin sanottu lasittuminen, kun ne muuttuvat korkean lämpötilan elastisesta muodosta matalan lämpötilan lasittuneeseen muotoon. Tämä muutos vaikuttaa materiaalin moniin fysikaalisiin ominaisuuksiin, kuten ominaislämpökapasiteettiin, kimmomoduliin ja lämmönjohtavuuteen. Muutos tapahtuu muutaman asteen ja muutaman kymmenen asteen alueella. Tämän alueen keskikohtaa kutsutaan lasittumislämpötilaksi (T_g). Kuivan selluloosan lasittumislämpötila on noin 220 °C. Polymeerin lasittumislämpötila riippuu voimakkaasti sen kiteytymisasteesta. Kiteytyminen vaikuttaa myös polymeerin lämmönkesto. Mitä kiteytyneempi rakenne, sitä parempi on polymeerin lämmönkesto. /18/.

Aurela, Vuorimaa ja Lindell /19/ ovat tutkineet migraatiota uuninkestävistä kartongeista. Kartongit olivat päällystetty PET-, PP ja dispersiopäällysteellä. Kaikkien kartonkien kokonaismigraatio oli alle 10 mg/dm^2 , joka on hyväksymisen raja-arvo muovimateriaalien migraatiolle. Tutkimuksessa havaittiin yhdisteitä, jotka ovat peräisin ligniinistä. Vanilliini ja koniferyyialdehydi ovat hajoamistuotteita ligniinin pyrolyysistä. Tutkimuksessa ei havaittu lainkaan yhdisteitä, jotka olisivat peräisin PET-päällysteestä. Tutkimuksen perusteella migraatio ei ole rajoittava tekijä uuninkestävissä kartongeissa. Paperin liimauksessa käytettävistä aineista peräisin olevat yhdisteet aiheuttivat merkittävimmän migraation.

2.3.2 Muovit

Muovien ominaisuudet muuttuvat huomattavasti lämpötilan muuttuessa. Mitä kauemmin muovi on korkeassa lämpötilassa, sitä suurempia muutoksia sen fysikaalisessa rakenteessa ja kemiallisessa koostumuksessa tapahtuu. /20, s. 59/.

Muovien lämmönkestosta ilmoitetaan yleensä niiden lyhyt- ja pitkäaikaisia suurimpia sallittuja käyttölämpötiloja. Kestomuovien lyhytaikaiset maksimikäyttölämpötilat ovat yleensä välillä $60\text{--}200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ja pitkäaikaiset välillä $60\text{--}150 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Lukuihin pitää suhtautua varauksellisesti, koska ominaisuuksien säilymisestä korkeissa lämpötiloissa ei aina ole tutkittua tietoa. /20, s. 59/.

Amorfisilla kestopuoveilla on kaksi merkittävää muutoslämpötila-aluetta. Lasittumislämpötilassa amorfinen muovi pehmenee. Tämä tapahtuu melko laajalla lämpötila-alueella. Toisessa muutoslämpötilassa amorfinen muovi muuttuu juoksevaksi. Lasittumislämpötilaa korkeammassa lämpötilassa amorfisten muovien jäykkyys putoaa huomattavasti. /20, s. 60/.

Osakiteisillä puoveilla lasittumislämpötila vaikuttaa vain rakenteen amorfisiin osiin. Tämän vuoksi osakiteiset muovit säilyttävät lujuutensa myös huomattavasti lasittumislämpötilaa suuremmissa lämpötiloissa ja pehmenevät vasta lähellä niiden sulamispistettä. /20, s. 60/.

2.3.3 Liima-aineet

Kaikki polymeerimateriaalit hajoavat jossain määrin kun ne lämmitetään korkeisiin lämpötiloihin. Jos liima-ainetta lämmitetään paljon sen lasittumislämpötilan yläpuolelle, sen molekyylit muuttuvat niin joustaviksi, että niiden koheesio pienenee. Tällöin liima-aine on altis virumiselle ja suuremmalle kemikaalien ja kosteuden tunkeutumiselle. Yleisesti liiallisella lämmöllä on seuraavanlaisia vaikutuksia liima-aineeseen /21, s. 766/:

- Katkenneita polymeerimolekyyliä, jotka alentavat molekyylimassaa; heikentynyttä koheesiota ja sivutuotteita
- Jatkuva ristosilloittuminen, joka johtaa sidosten haurastumiseen ja kutistumiseen
- Notkistavien lisäaineiden haihtuminen, joka johtaa sidosten haurastumiseen
- Hapettuminen hapen tai metallioksidien läsnä ollessa, mikä johtaa heikompaan koheesioon

Jotta liima-aine kestäisi korkeaa lämpötilaa, sillä tulisi olla korkea sulamis- tai pehmentymispiste ja hapettumisen vastustuskyky. Lisäksi liima-aineessa ei tulisi tapahtua lämmön aiheuttamaa polymeeriketjun katkeilua. /21, s. 767-768/.

Kertamuoveihin perustuvat liima-aineet kestävät korkeita lämpötiloja ristosilloittumisen vuoksi /21, s. 767/. Kertamuoveihin perustuvat liima-aineet eivät kuitenkaan sovellu suunniteltuun käyttötarkoitukseen, koska ne eivät ole kuumasäilyttävissä. Mahdollisia kestumuveja, jotka kestävät korkeita lämpötiloja, ovat polyesteri, polysulfoni ja akryyli. Polyesteriä käytetään yleensä sulateliimana ja sen sulamispiste on noin 260 °C. Polysulfoniin perustuvia liima-aineita käytetään tavallisesti liuoksena. 190 °C lämpötilassa ne säilyttävät rakenteellisesta lujuudestaan 60 % verrattuna lujuuteen huoneenlämmössä. Akryylejä käytetään liuoksina tai emulsioina. Niillä on hyvä kestävyys lämpöiskuille. Akryyliä lämmönkesto riippuu polymeerin muiden komponenttien ominaisuuksista. /21, s. 467-469/.

2.4 Elintarvikelainsäädäntö

2.4.1 Yleistä

Elintarvikelainsäädännön päätarkoituksena on elintarvikkeiden terveydellisen laadun turvaaminen sekä kuluttajan suojaaminen ihmisravinnoksi soveltumattomien elintarvikkeiden aiheuttamilta terveyshaitoilta ja määräysten vastaisten tuotteiden aiheuttamilta taloudellisilta tappioilta. /22, s. 12/.

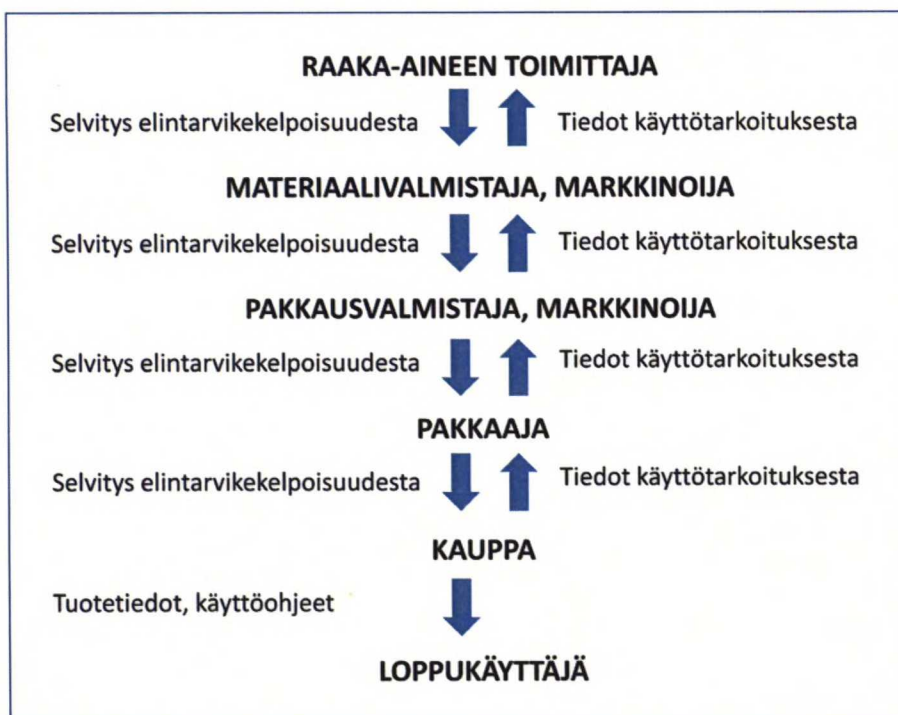
Euroopan yhteisöjen neuvoston direktiivi 89/397/EY virallisesta elintarvikevalvonnasta edellyttää, että elintarvikkeiden kanssa kosketukseen joutuvia aineita ja tarvikkeita valvotaan samanaikaisesti elintarvikkeiden kanssa. Kauppa- ja teollisuusministeriöllä on valtuudet antaa tarkempia määräyksiä elintarvikkeiden kanssa kosketukseen joutuvista materiaaleista. Valvontaviranomaisilla on elintarvikkeen kanssa kosketuksiin joutuvien aineiden ja tarvikkeiden kohdalla vastaavat oikeudet ja velvoitteet kuin elintarvikkeiden kohdalla. /22, s. 12/.

Elintarvikkeen kanssa kosketukseen joutuvan materiaalin tulee olla sellainen, ettei se tee elintarviketta terveydelle vahingolliseksi tai ihmisravinnoksi sopimattomaksi, eikä materiaalista saa siirtyä elintarvikkeeseen ainesosia niin, että ne muuttavat sopimattomalla tavalla elintarvikkeen koostumusta tai pilaavat sen ominaisuuksia. /22, s. 13/.

Elintarvikelaki asettaa elinkeinonharjoittajalle tietoisuus- ja huolellisuusvelvoitteen. Velvoitteesta seuraa, että sen, joka saattaa elintarvikkeen kosketukseen tietyn materiaalin kanssa, on otettava selvää kyseisen materiaalin soveltuvuudesta elintarvikekäyttöön. Elintarvikealan toimijan tulee suorittaa omavalvontaa ja siten osoittaa vastaavansa siitä, että elintarvikkeiden pakkaamiseen käytetään vain kuhunkin käyttötarkoitukseen soveltuvaa materiaalia. /22, s. 13/.

Jokainen valmistusketjussa oleva yritys joutuu kantamaan vastuun omasta osuudesta tuotantoketjussa niin, että elintarvikepakkaus täyttää sille asetetut vaatimukset. Elintarvikekelpoisuuden varmistamiseksi tuotantoketjun eri vaiheiden

toimijoiden on pyydettävä tavarantoimittajiltaan selvitys näiden tuotteiden kelpoisuudesta määriteltyyn tarkoitukseen. Hyvä tiedonkulku toimijoiden välillä on tärkeää. Kuvassa 1 on esitetty vastuun jakautuminen ja tiedonkulku eri toimijoiden kesken. /22, s. 21/.



Kuva 1. Vastuun jakautuminen ja tiedonkulku elintarvikepakkausten valmistusketjussa /22, s. 22/.

2.4.2 Muovit

Muovimateriaalien koostumuksesta ja ainesosien siirtymisestä on säädetty kauppa- ja teollisuusministeriön asetuksessa 953/2002 elintarvikkeen kanssa kosketuksiin joutuvista muovisista tarvikkeista, jolla on pantu täytäntöön EY komission direktiivi 2002/72/EY elintarvikkeen kanssa kosketukseen joutuvista muovisista tarvikkeista. Tätä säädöstä sovelletaan vain sellaisiin tarvikkeisiin tai osiin, jotka koostuvat pelkästään muovista. Muovisten tarvikkeiden valmistuksessa saa käyttää ainoastaan direktiivin liitteen II jaksoissa A ja B mainittuja monomeereja ja muita lähtöaineita liitteessä säädetyin poikkeuksin. /22, s. 13-14/.

Muovisen tarvikkeen elintarvikekelpoisuuden toteamiseksi on tutkittava, kuinka paljon ainesosia siirtyy kosketuksessa olevaan elintarvikkeeseen. Muovisista tarvikkeista saa siirtyä niiden ainesosia elintarvikkeeseen enintään 10 mg elintarvikkeen kanssa kosketukseen joutuvan pinnan yhtä neliödesimetriä kohden tai eräissä tapauksissa 60 mg siirtyneitä ainesosia kiloa elintarviketta kohti. Testauksessa käytetään eri elintarviketyyppejä jäljitteleviä aineita, kuten tislattua vettä, 3-prosenttista etikkahapon vesiliuosta, 10-prosenttista etanolin vesiliuosta ja puhdistettua oliiviöljyä. Materiaalin testausolosuhteet (aika ja lämpötila) valitaan todellisen elintarvikekosketustilanteen perusteella. /22, s. 14/.

2.4.3 Kuitumateriaalit

Elintarvikkeen kanssa kosketukseen joutuvasta paperista ja kartongista on säädetty kauppa- ja teollisuusministeriön päätöksellä 143/1993. Päätöksessä paperilla ja kartongilla tarkoitetaan yhdestä tai useammasta selluloosaperäistä kuitua sisältävästä ainekerroksesta muodostuvaa materiaalia. Selluloosaperäisen kuidun lisäksi materiaali voi sisältää muita kuituja, muovi- ja sideaineita, täyteaineita värejä ja muita lisäaineita. Materiaali voi olla kyllästetty, pinnoitettu tai käsitelty jollakin muulla tavalla joko valmistuksen aikana tai sen jälkeen. Päätös sisältää luettelon kuitumateriaalin valmistuksessa sallituista side-, täyte-, väri- ja lisäaineista. Ensikuidun lisäksi raaka-aineena saa käyttää paperiteollisuuden valmistus- ja jalostusprosesseissa kertyvää puhdasta hylkypaperia. Keräyspaperia saa käyttää vain, jos se on kerätty tarkkaan määrättyistä lähteistä. Paperin painoväriä sisältävät pinnat eivät saa joutua kosketuksiin elintarvikkeen kanssa. /22, s. 15/.

Euroopan Neuvoston päätöslauselma ResAP (2002) 1 elintarvikekäyttöön tulevista kuitupohjaisista materiaaleista antaa uudet yleiseurooppalaiset linjat kuitumateriaalin käytölle elintarvikepakkausmateriaalina. Päätöslauselman on tarkoitus olla uuden direktiivin pohjana. Olennainen muutos nykyiseen lainsäädäntöön on, että laajempi keräyskuidun käyttö tulee mahdolliseksi. /22, s. 15/.

2.4.4 Pinnoitteet

Pinnoitteista, kuten polymeeripinnoitteista kuitumateriaalin päällä, ei ole säädetty EU:n tasolla. Komissio pohtii, laajennetaanko muovidirektiivi 2002/72/EY kattamaan myös pinnoitteet. Näin ollen pinnoitteissa noudatetaan kauppaja teollisuusministeriön päätöstä 400/1996 elintarvikkeen kanssa kosketuksiin joutuvista tarvikkeista. /22, s. 18/.

3 JOUSTOPAKKAUSTEN PAINAMINEN

3.1 Menetelmät

3.1.1 Yleistä

Joustopakkaukset painetaan rullalta rullalle. Pääasialliset painomenetelmät joustopakkausmateriaaleille ovat flekso- ja syväpainatus. Joissain tapauksissa käytetään web-offset -painatusta. Joustopakkausmateriaalin painamiseen on myös mahdollista käyttää digitaalipainatusta, joka soveltuu erityisesti pienille erille. Tulevaisuudessa digitaalipainatusta on tekniikan kehittyessä kannattavaa käyttää yhä suuremmille erille ja sellaisille tuotteille, joiden pakkausta halutaan vaihdella yksilöittäin. /23, s. 91/. Yksilöidyt pakkaukset ovat mahdollisia, koska digitaalipainatuksessa painoinformaatio tulee reaaliaikaisesti tietokoneella, mikä mahdollistaa sen, että haluttaessa jokaisessa pakkauksessa voi olla erilainen painatus. Yksilöityjä pakkauksia voidaan hyödyntää esimerkiksi markkinointitarkoituksissa.

3.1.2 Fleksopaino

Pakkausteollisuudessa fleksopaino on käytetyin painomenetelmä. Fleksopainatus on suora rotaatiokohopainomenetelmä, jossa painettava informaatio on kohokuvioina joustavasta materiaalista valmistetulla painolaatalla. Polymeerilaatalle johdetaan matalaviskoottista painoväriä rasteri- eli aniloxtelalla. /24, s. 114-115/.

Fleksopaino soveltuu pakkausten painatukseen joustavuutensa takia. Sillä voidaan painaa lähes kaikkia pakkausmateriaaleja. Lisäksi fleksopainolaattojen valmistus on edullisempaa kuin syväpainossa käytetyn painotelan valmistus. Euroopassa fleksopainatus on yleisin pakkausmateriaalien painomenetelmä. Fleksopainokone koostuu 2-10 painoyksiköstä. Yksiköillä on joko omat vastapainotelansa tai kaikilla on iso yhteinen vastapainotela. /24, s. 116/.

Painojäljen tarkkuus riippuu mm. painolaatan materiaalista, rakenteesta, paksuudesta, painomateriaalin pinnalle siirtyneen värin määrästä, värin juoksevuudesta, puristusvoimasta, kuvan kohdistustarkkuudesta sekä painettavan materiaalin ominaisuuksista. /24, s. 116/.

3.1.3 Syväpaino

Syväpainossa painettava kuvio on kaiverrettuna mekaanisesti, kemiallisesti tai optisesti sylinterin pintaan, jonka avulla väri siirretään painomateriaalille. Ylimääräinen väri kaavitaan sylinteriltä, jolloin väriä jää ainoastaan rasterikuppeihin. Painoväri siirtyy painomateriaaliin kun materiaali puristetaan telaa vasten painotelan ja vastatelan välisessä nipissä. /24, s. 116/.

Syväpainoa käytetään sen hyvän painolaadun sekä suurten sarjojen edullisen painamisen vuoksi. Suurten sarjojen painaminen on edullista, koska painosylinteri ei juuri kulu käytössä eikä sitä sen vuoksi tarvitse uusia. Syväpainokone koostuu yleensä 8-12 painoyksiköstä. Jokaisella yksiköllä on oma kuivain, joten painaminen tapahtuu märkää kuivalle -periaatteella. /24, s. 117/.

3.2 Painovärit

Mekaanisissa painomenetelmissä käytettävät painovärit koostuvat pääasiassa pigmentistä, sideaineesta ja kantavasta aineesta. Pigmentit ovat värillisiä yhdisteitä, joiden tehtävänä on tuottaa painoalustalle kontrastia ja väriä. Sideaineet ovat polymeerejä, joiden tehtävänä on sitoa pigmentit painoalustaan. Pigmentit ja sideaineet ovat sekoittuneena kantavaan aineeseen, jolla ne kuljetetaan painoalustalle. Kantava aine voi olla vettä, orgaanista liuotinta tai öljyä. Kantavan aineen tärkein ominaisuus on kyky liuottaa sidosaine itseensä. Kun painoväri on siirretty painoalustalle, kantava aine joko haihdutetaan (syväpaino, flekso, heat-set offset), hapetetaan kiinteäksi (arkkioffset), polymerisoidaan säteilyttämällä (arkkioffset) tai absorboidaan painoalustaan (cold-set offset). /25/.

Pakkauksissa käytettävien painovärien tulee täyttää ne vaatimukset, jotka kohdistuvat painatuksen kestävyys- ja pakkauksen ulkonäköön. Painojäljen tulee kestää mekaanisia ja kemiallisia rasituksia, kuten naarmuuntuminen, hankautuminen, valo, lämpö, rasva, saippua ja sääolosuhteet. Ulkonäön vaatimukset ovat kiilto, sävy, värin voimakkuus ja kohdistus sekä subjektiivinen yleisvaikutelma. /24, s. 120/.

Joustopakkausten painamisessa voidaan käyttää kaikkia tavallisia painovärilajeja mukaan lukien metalli- ja fluoresoivat värit. UV-värejä käytetään antamaan korkeaa kiiltoa, hankauskestävyyttä ja kuumasaumattavien alueiden lämmönkestävyyttä. Painokuvio voidaan lakata, jolloin saadaan kiiltävä tai matta viimeistely. Tarvittaessa materiaalin toiselle puolelle voidaan painaa kohdistettu kuuma- tai kylmäsaumauspäällyste, jos materiaalilla itsellään ei ole saumautuvuusominaisuutta, kuten paperilla. /23, s. 91/.

Painovärit, joita ei ole tarkoitettu kosketukseen elintarvikkeen kanssa, on valmistettava ja käytettävä siten, että painopinnalta ei siirry yhdisteitä elintarvikkeen kanssa kosketukseen tulevalle, painamattomalle pinnalle. Painettu pinta ei myöskään saa tulla suoraan kosketukseen elintarvikkeen kanssa. Painovärin migraatio elintarvikkeeseen voi tapahtua joko penetroitumalla materiaalin läpi tai set-off -ilmiön kautta. Set-off voi tapahtua painettujen materiaalien säilytyksessä pinossa tai rullassa, jolloin painoväri pääsee kosketuksiin elintarviketta vastaan tulevan pinnan kanssa. /26, s. 3-4/.

Painoväri on tuoteturvallinen ainoastaan, kun se on kunnolla kuivattu tai polymeroitu. Nämä mekanismit saattavat nestemäisen värin kiinteään tilaan. Kuivattuksesta puhutaan, kun väreistä haihdutetaan liuottimia lämmön ja ilmavirran avulla. Polymeroituminen tarkoittaa prosessia, jossa värissä olevat komponentit reagoivat keskenään muodostaen kiinteän rakenteen. Kunnollinen kuivaus ja polymeroituminen estävät vapaiden painovärikomponenttien jäämisen painettuun materiaaliin ja vähentää niiden riskiä siirtyä elintarvikkeeseen. /26, s. 5/.

4 PAKKAAMINEN

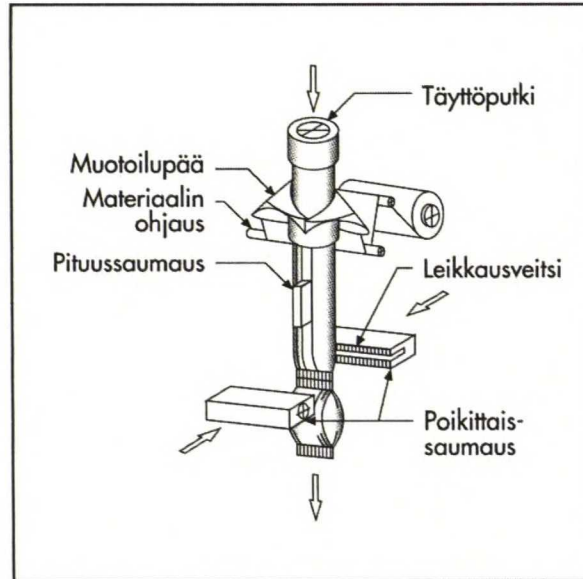
4.1 Yleistä

Form-fill-seal (muodostus-täyttö-sulkeminen, FFS) on pakkaustapa, jossa pakkaus muodostetaan samalla koneella juuri ennen täyttöä. FFS-pakkaamisen etuna on, että pakkausmateriaali voidaan toimittaa pakkauskoneelle rullana. Materiaalista joko muodostetaan putki, joka saumataan ja täytetään tasaisin välein tai taiteetaan pituussuunnassa ja saumataan poikkisuunnassa muodostaen taskuja, jotka täytetään ja suljetaan. Pakkauksen koko voi vaihdella pienistä hyvin pienistä yksittäispakkauksista suuriin teollisuuspakkauksiin. Koosta huolimatta koneiden toimintaperiaate on samanlainen. FFS-pakkaaminen voi olla jatkuvaa tai ajoittaista. Jatkuvasta FFS-pakkaamisesta käytetään nimeä flow-pack-pakkaaminen. /5, s.405-406, 4, s. 122/.

4.2 Flow-pack -koneen toiminta

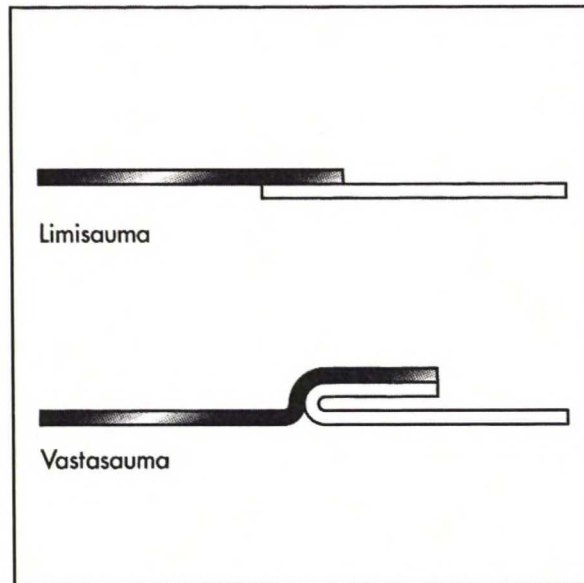
4.2.1 Pysty-flow-pack

Joustopakkaukset pakataan pääasiassa pysty- tai vaaka-flow-pack -koneilla. Tyypillisessä pysty-flow-pack -koneessa pakkausmateriaali aukirullataan koneen takana ja johdetaan kauluksen ympärille. Kaulus muodostaa radasta putken. Putken pitkittäinen sauma suljetaan saumauspyörien avulla ja tuote/tuotteet annostellaan putkeen ylhäältä. Täyttämisen jälkeen poikittaiset leuat tekevät päätysauman. Sauma katkaistaan keskeltä, jolloin pakkaus on valmis ja seuraavan pakkauksen pohjasauma on jo tehty. Pysty-flow-pack -koneen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 2. /5, s.294/.



Kuva 2. Pysty-flow-pack -kone. /27, s. 92/.

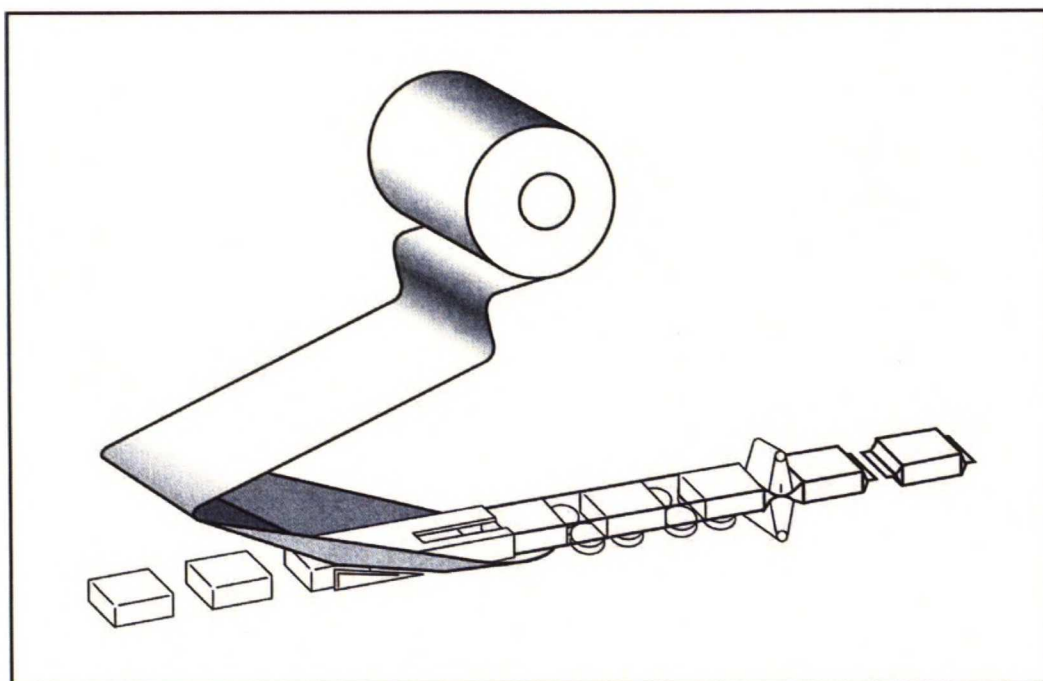
Pitkittäissauma voidaan taittaa joko limisaumaksi tai vastasaumaksi. Kuvassa 3 on kaavakuvat molemmista saumoista. Limisaumassa materiaalin eri puolet saumataan toisiinsa, jolloin materiaalin molempien puolien tulee olla kuumasaumattavia. Vastasaumassa riittää, että materiaalin toinen pinta on kuumasaumautuva. Sauman tyyppi riippuu käytetystä kauluksesta. Limisauman etuna on vähäisempi pakkausmateriaalin tarve. /4, s.125-127, 27, s. 87/.



Kuva 3. Limisauma ja vastasauma. /27, s. 87/.

4.2.2 Vaaka-flow-pack

Vaaka-flow-pack -koneessa pakkausmateriaali syötetään vaakasuunnassa taitto-laatikkoon. Tuote syötetään tähän laatikkoon kuljettimella, joka toimii tahdistetusti saumaus- ja leikkausleukojen kanssa. Pakkausmateriaali saumataan ensin putkeksi jonka jälkeen tehdään päätysauma. Sauma katkaistaan keskeltä kuten pysty-flow-pack -koneessa. Pitkittäissaumassa käytetään vastasaumaa. Pakkausmateriaali voidaan tuoda joko tuotteen ala- tai yläpuolelta, jolloin pitkittäissauma jää pakkauksen ylä- tai alapuolelle. Kuvassa 4 on esitetty vaaka-flow-pack -koneen toimintaperiaate. /5, s.295, 27, s. 92/.



Kuva 4. Vaaka-flow-pack -kone. /27, s. 92/.

4.3 Saumaaminen

4.3.1 Pintaenergia

Liima-aineen kyky kastella liimattava pinta ja työ, joka vaaditaan liima-aineen poistamiseksi pinnasta, ovat riippuvaisia liima-aineen, pinnan ja niiden välisen rajapinnan pintaenergioista, γ . Samaa tarkoitetaan, kun puhutaan pintajännityk-

sestä. Nesteille pintaenergian ja -jännityksen numeroarvot ovat identtiset. Pintaenergian yksikkö on mJ/m^2 ja pintajännityksen N/m . /21, s. 41/.

Nesteen pintajännitys tarkoittaa nesteen todellista pintarasitusta. Kiinteässä aineessa tehdään työtä pinnan venyttämiseen mutta ei pinnan muodostamiseen. Kiinteälle aineelle pintaenergia ja pintajännitys eivät ole yhtä suuria, vaan pinnan jännitys on suurempi kuin pintaenergia. /21, s. 42/.

Kiinteiden aineiden pintaenergioita voidaan mitata käyttäen kontaktikulmamittausta. Siinä testattavalle pinnalle pudotetaan tippa nestettä, joka muodostaa pinnan kanssa tasapainon. Kulma, jonka pisara muodostaa pinnan kanssa, mitataan. Kulma voidaan ilmaista eri jännityksillä, jotka vaikuttavat kolmen faasin (kiinteä, neste, kaasu) rajapinnassa. Vaikuttavien voimien tasapaino on ilmaistu Youngin yhtälössä /21, s. 41/:

$$\gamma_{LV} \cos \theta = \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \quad (10)$$

jossa	θ	on	kontaktikulma
	γ_{LV}	on	nesteen ja höyryn välisen rajapinnan jännitys
	γ_{SV}	on	kiinteän aineen ja höyryn välisen rajapinnan jännitys
	γ_{SL}	on	kiinteän aineen ja nesteen välisen rajapinnan jännitys

Pintaenergia riippuu tekijästä γ_{SV} seuraavasti

$$\gamma_{SV} = \gamma - \pi_e \quad (11)$$

jossa	γ	on	kiinteän aineen todellinen pintaenergia
	π_e	on	tasapainoleviämispaine (equilibrium spreading pressure)

Tasapainoleviämispaine on höyryn adsorptiossa kiinteän aineen pintaan vapautuvan energian määrä, mikä pienentää vapaan pintaenergian määrää. /21, s. 41-42/.

4.3.2 Viskositeetti

Pinnan kastuminen liima-aineesta riippuu aineen leviämisestä pinnalla ja aineen tunkeutumisesta pinnan huokosiin. Leviämistä hallitsee liima-aineen ja pinnan

pintaenergiat. Tunkeutuminen on riippuvainen pinnan karheudesta ja levitettävän liima-aineen viskositeetista. /21, s. 62-63/.

Viskoottinen liima-aine näyttää leviävän pinnalle tasaisesti, mutta todellisuudessa sen ja pinnan väliin jää ilmataskuja. Jos liima-aineen viskositeetti on liian suuri, se ei ehdi täyttää kaikkia koloja ennen asettumistaan. Tämän vuoksi liima-aineen tunkeutuminen kilpailee ajasta asettumisen kanssa. /21, s. 64-65/.

4.3.3 Adheesio

Adheesiolla tarkoitetaan materiaalin sidosta toiseen materiaaliin. Koheesio puolestaan tarkoittaa materiaalin sisäisiä sidoksia. Liima-aineet, joiden koheesio on matala, taipuvat virumaan rasituksessa ja näin ollen eivät vastusta leikkausrasituksia, joita saumaan kohdistuu. Liima-aineen koostumus on usein tasapaino adheesio- ja koheesio- välillä. /5, s.257/.

Eri adheesiot teoriat pyrkivät selittämään, miksi aineet tarttuvat toisiinsa. Mekaaninen adheesio teoria esittää, että nestemäinen liima-aine virtaa pinnan pieniin koloihin täyttäen ne. Kovettuessaan liima-aine lukittuu mekaanisesti huokosiin eikä sitä voi enää vetää pois rikkomatta pintaa. Mekaaniset sidokset eivät voi koskaan olla vahvempia kuin liimatun materiaalin pintalujuus. /5, s.257/.

Diffuusio teorian mukaan yhteensopivat materiaalit, joilla on samanlainen liukoisuus, voivat muodostaa siirtymäalueen, jolla materiaalien keskinäinen diffuusio tapahtuu. Tähän vaaditaan molekyylien läheistä kontaktia, eli kastumista. Keskinäinen diffuusio tapahtuu vain identtisten tai yhteensopivien polymeerien välillä esimerkiksi yhdistettäessä samaa polymeeriä olevia pintoja toisiinsa. Erilaisten polymeerien keskinäinen diffuusio ei ole todennäköistä. Keskinäistä diffuusiota rajoittavat polymeerin ristosilloittuminen ja kiteytyneisyys. Keskinäistä diffuusiota tapahtuu kestopuovien kuumasaumauksessa. /28/.

Elektrostaattinen teoria perustuu ajatukseen sähköisestä kaksoiskerroksesta eri materiaalien tullessa kosketukseen toistensa kanssa. Materiaalien Fermi-tasojen

tasapainottaminen edellyttää varauksen siirtymistä rajapinnan yli. Liima-aine ja liimattava aine toimivat kondensaattorina ja adheesio vetovoimana kaksoiskerroksen yli. /28/.

Termodynaamisen adsorptioteorian olennaiset osat ovat materiaalien läheinen kontakti sekä molekylaariset ja fysikaaliset vuorovaikutukset niiden välillä. Teorian mukaan pinnan kastuminen on edellytys adheesiolle ja materiaalien keskinäinen diffuusio ei riitä saavuttamaan kunnon adheesiota. /28/.

Kemiallinen adheesioteorian mukaan sidos tapahtuu, kun pienen pienet positiivisesti ja negatiivisesti varatut alueet tuodaan tarpeeksi lähelle toisiaan, jotta ne voivat vetää toisiaan puoleensa. Pintavaraukset johtuvat pääasiassa van der Waalsin voimista, joiden vaikutusalue on molekyylin kokoluokkaa. /5, s.258/. Tällöin voidaan puhua fysikaaliskemiallisista vuorovaikutuksista /29/. Vetovoima voi myös johtua happo-emäs -attraktiosta, kovalenttisesta sitoutumisesta tai metallisidoksista. /28/.

Fysikaaliskemialliset vuorovaikutukset ovat merkittävä tekijä paperimateriaalien adheesiossa. Steffner, Dickson ja LePoutre /29/ ovat tutkineet mekaanisen adheesion vaikutusta päällystetyssä paperissa. Tutkimuksen mukaan laboratorioarkkien huokoisuuden lisääminen kasvatti paperin ja päällysteen välistä adheesiota.

Liiman ja pinnan välinen adheesio on usein suurempi kuin liiman koheesio, minkä vuoksi liiman lisääminen voi heikentää sauman lujuutta. Sidoksen suurin lujuus saavutetaan, kun pinnat ovat täydellisesti peitetty sellaisella määrällä liimaainetta, jotta ne yhdistyvät toisiinsa. Jos liima-aineen koheesio on huono, ylimääräinen liima-aine heikentää sauman lujuutta. Jos liima-aineella on suuri koheesio, aineen lisääminen vain lisää sauman paksuutta. Molemmissa tapauksissa kustannukset kasvavat. /5, s.258-259/.

Hyvään sidokseen vaaditaan, että liima-aineen molekyylit pääsevät läheiseen kontaktiin pinnan kanssa. Parhaiten se onnistuu aineella, joka virtaa ja mukautuu liimattavaan pintaan. Siksi liima-aineen tulee olla nestemäistä annostelun ja sidoksenmuodostuksen hetkellä. Lisäksi liima-aineen pitää pystyä kastelemaan liimattava pinta, joten pinnan pitää olla polaarisuuteen. Kasteleminen tarkoittaa, että liima-aine täyttää pinnan epätasaisuudet. Kasteleminen ei tapahdu kunnolla, jos liima-aine jää sil-laksi pinnan epätasaisuuksien päälle. Jotta liima-aine kastelisi pinnan, sen pinta-jännitys ei saa olla suurempi kuin pinnan kriittinen pintajännitys. Taulukoissa 2 ja 3 on esitetty eräiden nesteiden pintajännityksiä ja eräiden aineiden kriittisiä pin-tajännityksiä huoneenlämmössä. Joidenkin materiaalien, kuten polyetyleenin, pinta on erittäin pooliton, jolloin niitä on vaikea liimata ilman polaarisuutta lisää-vää pintakäsittelyä. /5, s.259; 21, s. 48/.

Taulukko 2. Eräiden nesteiden pintajännitys huoneenlämmössä /21, s. 44/.

Neste	Pintajännitys (N/m)
Polydimetyyli siloksaani	16
Silikonijölly	19
Glyseroli	64
Hexaani	18
Asetoni	23
n-propanoli	24
tolueeni	28
vesi	73

Taulukko 3. Eräiden aineiden kriittinen pintajännitys huoneenlämmössä /21, s. 44-45/.

Aine	Pintajännitys (N/m)
Alumiini	~500
Lasi	~1000
Akryyli	41
Polyetylenei tereftalaatti (PET)	43
Polysulfoni	41
Polytetrafluoroetylenei (PTFE)	18
Polyetylenei	31
Polypropylenei	33
Silikoni	24

4.3.4 Saumautuvuus

Suurin osa joustopakkausista suljetaan kuumasaumaamalla. Sauma muodostetaan sulattamalla kuumasaumautuvaa materiaalia ja puristamalla se samanaikaisesti kiinni toiseen pintaan. Lämmön vaikutuksesta polymeerimolekyylit sekoituvat ja sulavat yhteen. Pintojen adheesio perustuu molekyylien vapaiden ja liikkuvien päiden diffuusioon saumattavien pintojen välillä. Kuumasaumauksessa pintoja yhdistävät voimat ovat sekundäärisiä valenssivoimia. Jos molekyylit ovat polaarisia tai ne sisältävät polaarisia ryhmiä, pintojen välillä esiintyy myös van der Waals -voimia. Polaarisia ryhmiä voidaan muodostaa liekki-, sähkö tai kemiallisella käsittelyllä. /5, s.296, 2, s. 44/.

Saumauksessa tärkeät muuttujat ovat saumauslämpötila, saumausaika, saumausleukojen paine ja saumausleukojen kuvio. Saumauslämpötila on tärkein saumausmuuttuja. Se nostaa molekyylien energiatasoa yli vaadittavan aktivaatioenergian. Sauman syntymisen edellytyksenä on, että saumauskohdan lämpötila on vähintään yhtä korkea kuin polymeerin sulamislämpötila. Lämpötila vaikuttaa myös rajapinnoissa liikkuvien molekyylien määrään ja molekyyliketjujen diffusiosyvyyteen vastakkaisissa pinnoissa. Saumauslämpötilalla on suuri merkitys siihen, syntyykö saumasta fuusioitunut vai peelautuva eli helposti avattava. Peelautuva sauma saadaan, kun saumaus suoritetaan lähellä muovin sulamislämpötilaa. /2, s. 45/.

Polymeeriketjujen diffuusio toisiinsa kuumasaumauksessa on riippuvainen ajasta. Ketjujen päät kulkeutuvat sitä syvemmälle toiseen polymeeriin, mitä kauemmin pintoja lämmitetään ja puristetaan yhteen. Tällöin saavutetaan parempi sauma. Saumausaika vaikuttaa tuotantonopeuteen, jolloin sen muuttaminen voi olla rajallista. Saumauspaineen tehtävänä on lisätä molekyylien välistä kontaktipinta-alaa. Myös saumausleukojen paineella on yleensä kapea käyttöalue, jolloin käytännössä ainoa todellinen muuttuja saattaa olla saumauslämpötila. Saumausaikaa ja painetta voidaan lisätä käyttämällä liikkuvia saumausleukoja, jotka siirtyvät pakkauksen mukana puristanen saumaa kiinni samanaikaisesti. Sau-

mausleuoissa on useimmiten aaltoileva tai uritettu kuvio. Vastakkaisten leukojen urien tulisi kulkea ristiin, jotta saavutetaan hyvä saumautuvuus. /4, s.125, 127, 129-130, 2, s. 46-47/.

Tärkeitä materiaalmuuttujia ovat kuumasaumautuvan materiaalin *pehmeysmisalue* ja koko rakenteen lämmönjohtavuus. Oikeiden saumausmuuttujien määrittäminen on tärkeää, jotta saavutetaan riittävän luja sauma. Sekä liian pienet että liian suuret lämpötilan ja paineen arvot johtavat heikkoon saumaan. Liian pienillä arvoilla pinnat eivät tartu toisiinsa kunnolla. Liian suurilla arvoilla kuumasaumautuva materiaali puristuu pois leukojen välistä. Tällöin sauma heikenee polymeeriketjujen orientoituessa virtaussuunnan mukaisesti. /5, s.296-297, 405/.

Saumausleuat ja -pyörät lämmitetään sähkövastuksilla, jotka ovat joko jatkuvalämmitteisiä tai impulssilämmitteisiä. Jatkuvalämmitteistä saumausta käytetään materiaaleissa, jotka eivät sellaisenaan ole kuumasaumautuvia. Impulssisaumasta käytetään materiaaleille, jotka itsessään ovat kuumasaumautuvia kummaltakin puolelta. Impulssisaumauksessa leuat lämmitetään hetkellisesti sähkövastuksilla hehkuvan kuumiksi, mikä sulattaa leukojen välissä olevat kalvot toisiinsa. Tämän jälkeen lämmitys lopetetaan ja leuoissa kiertävä jäähdytysvesi jäähdyttää sauman. /4, s.127/.

Kuumasaumattavan materiaalin *kuumatartunta* on tärkeä ominaisuus erityisesti vaaka-flow-pack -koneessa, jossa tuote rasittaa saumaa välittömästi saumauksen jälkeen. Materiaali, jolla on hyvä kuumatartuntakyky, vastustaa sauman repeämistä, vaikka on vielä kuuma. /5, s.297/.

Paperia tai kartonkia käytettäessä sauma on riittävän luja, kun repeäminen tapahtuu pääasiassa kuitujen katkeamisena, jolloin repeämiskohdassa voidaan nähdä katkenneita kuituja. Tällöin liima-aine on kulkeutunut paperin rakenteeseen ja lukittunut sinne. /30, s. 46, 6/.

4.3.5 Kuumasaumausaineet

Materiaalit, jotka eivät itse ole kuumasaumautuvia, vaativat kuumasaumautuvan päällysteen, jotta saumaaminen olisi mahdollista. Tällaisia materiaaleja ovat esimerkiksi alumiini ja paperi. /31, s. 449/.

Kuumasaumauslakan sideaineet pehmentyvät lämmitettäessä ja kiinnittyvät jäähdytettäessä sekä lakattuun että lakkaamattomaan pintaan. Lakkojen tarttumiskyky on riippuvainen pintamateriaalista. Kuumasaumauksessa on tärkeää saavuttaa pitävä sauma, mutta toisaalta sauman avattavuus on kuluttajan kannalta merkittävä asia. Avattavuus on riippuvainen kuumasaumauslakan, lakka-kerroksen paksuuden, saumattavan pinnan ja saumausolosuhteiden (lämpötila, aika, paine, saumauslaitteisto) yhteisvaikutuksesta. Hyvä avattavuus ei siten ole saavutettavissa vain kuumasaumauslakan valinnalla. Kuumasaumauslakka voidaan levittää koko pinnalle tai ainoastaan tarvittaviin kohtiin. /31, s. 449/.

Kuumasaumautuvuus voidaan myös saavuttaa laminoimalla kuumasaumautumattoman materiaalin pintaan kuumasaumautuva materiaali, kuten polypropeeni- tai PET-kalvo, tai erityisillä kuumasaumautuvilla barrierpäällysteillä. Samalla lisätään materiaalin barrierominaisuuksia. Barrierpäällysteet ovat yleensä dispersiopohjaisia, mikä tekee barrierpäällystetystä paperista kompostoitavan ja kierrätettävän ja siten ekstruusiopäällystettyä tai laminoitua paperia ympäristöystävällisemmän. Barriersovellukset perustuvat yleensä styreeniä, akrylaattia, metakrylaattia, butadieenia tai vinyylasetaattia sisältäviin polymeereihin tai kopolymeereihin, jotka levitetään yleensä vesipohjaisina emulsioina tai orgaanisina liuoksina. /6, 32/.

5 TUOTTEEN PAISTAMINEN

Uunissa tapahtuvat reaktiot voidaan jakaa fysikaalisiin ja kemiallisiin muutoksiin. Näiden reaktioiden tulee tapahtua oikeassa järjestyksessä, määrättyssä lämpötilassa, oikeaan aikaan ja oikeissa olosuhteissa. Tapahtuvat reaktiot on esitetty taulukossa 4. /33, s. 487/.

Taulukko 4. Paistamisen aikana tapahtuvat reaktiot. /33, s. 487/.

Fysikaaliset reaktiot	Kemialliset reaktiot
Kalvonmuodostuminen	Hiivan toiminta
Kaasun laajentuminen	Hiilidioksidin muodostuminen
Kaasun liukoisuuden vähentyminen	Tärkkelyksen gelatinoituminen
Nesteen haihtuminen	Gluteenin koaguloituminen
	Sokerin karamellisoituminen
	Ruskettuminen

Taikinaan alkaa muodostua kalvo heti uuniin panon jälkeen. Uunin korkea lämpötila (220-260 °C) tekee kalvon paksummaksi ja joustavammaksi. Joustavuus on riippuvainen uunissa olevan ilman kosteudesta. /33, s. 487/.

Myös taikinaan jääneiden kaasujen liukoisuuden vähentyminen alkaa heti, kun taikina on pantu uuniin. Tässä suhteessa merkittävin kaasu on hiilidioksidi, jota on taikinassa vapaana kaasuna gluteeniverkoston seassa, liuenneena taikinan sisältämässä nesteessä ja sitoutuneena heikoin sidoksin muihin taikinan aineisiin. Kun taikinan sisäinen lämpötila nousee noin 49 °C lämpötilaan, liennut ja sitoutunut hiilidioksidi vapautuu. Tällä on merkittävä vaikutus tuotteen kohoamiseen uunissa. /33, s. 488/.

Taikinan pinnalle muodostuneen kalvon sisälle jääneen kaasun tilavuus kasvaa uunin korkean lämpötilan vuoksi. Tapahtuma noudattaa Charlesin kaasulakia:

$$V = kT \quad (12)$$

jossa V on kaasun tilavuus
 k on vakio
 T on kaasun absoluuttinen lämpötila

Kaasulain mukaan tietyn kaasumäärän tilavuus vakioaineessa on suoraan verrannollinen absoluuttiseen tilavuuteen. /33, s. 488/.

Viimeinen fysikaalinen muutos on nesteiden haihtuminen. Tärkeimmät haihtuvat nesteet ovat vesi ja alkoholi. Vesi tulee prosessiin nesteenä ja poistuu nesteenä ja vesihöyrynä. Etyylialkoholia syntyy hiivan aiheuttamassa käymisprosessissa eräiden taikinan sokereiden läsnä ollessa. Alkoholin haihtuminen alkaa, kun taikinan sisäinen lämpötila saavuttaa 80 °C lämpötilan. Tämä kasvattaa höyryn sisäistä lämpötilaa ja lisää tuotteen kohoamista. /33, s. 488/.

Jo aineiden sekoituksessa alkanut hiivan toiminta jatkuu uunissa. Toiminta loppuu, kun taikinan lämpötila nousee noin 63 °C lämpötilaan. Hiivan toiminta tuottaa pääasiassa hiilidioksidia ja etyylialkoholia. Hiilidioksidin muodostuminen kiihtyy, kun taikinan lämpötila saavuttaa edellä mainitun lämpötilan. Hiilidioksidi on merkittävä tekijä tuotteen kohoamisessa. /33, s. 488/.

Tärkkelys absorboi noin 30 % painostaan vettä paisuen samalla hieman. Veden haihtuessa tärkkelys palaa takaisin alkuperäiseen muotoonsa. Lämmitettäessä vettä ja tärkkelystä 54 °C lämpötilaan tärkkelys absorboi vettä hyvin voimakkaasti ja paisuu moninkertaiseksi alkuperäisestä koostaan. Tämä reaktio on tärkkelyksen gelatinoituminen. /33, s. 488/.

Taikinan gluteenin muodostavat proteiinit muuttuvat palautumattomasti korkeissa lämpötiloissa. Muutos alkaa 74 °C lämpötilassa. Sen seurauksena proteiinien liukoisuus ja joustavuus vähentyvät. /33, s. 488/.

Sokerit, kuten fruktoosi, maltoosi ja dekstroosi, muodostavat noin 170 °C lämpötilassa värillisiä aineita. Tämä karamellisoitumisreaktio tapahtuu vain leivän kuo-

ressa, koska leivän sisus ei koskaan ylitä 100 °C lämpötilaa. Varsinainen rusketuminen alkaa noin 160 °C lämpötilassa. Se johtuu sokereiden reaktiosta proteiinien tai muiden typpipitoisten aineiden kanssa. Reaktiotuotteena syntyy melanoidiineja, jotka alhaisissa lämpötiloissa muistuttaa karamellisoitumisreaktion tuotteita. Korkeammissa lämpötiloissa (245-260 °C) melanoidiinit muuttuvat mustiksi, kitkerän makuisiksi ja liukenemattomiksi. /33, s. 489/.

6 ELINKAARITARKASTELU

6.1 Yleistä

Ihmisten ympäristötietoisuus on lisääntynyt viime aikoina voimakkaasti. Määrättyjen luonnonvarojen rajallisuus ja ihmisen toiminnasta aiheutuvat ympäristövaikutukset ovat tuttuja asioita myös tavalliselle ihmiselle. Tämän vuoksi myös vaatimukset toiminnan, kuten pakkaamisen, ympäristöystävällisyydelle ovat lisääntyneet. On kuitenkin muistettava, että pakkauksen sisällöstä aiheutuu paljon suuremmat ympäristövaikutukset kuin itse pakkauksesta. Kehittyneissä maissa ruoan tuotanto kuluttaa kymmenen kertaa enemmän energiaa kuin pakkauksen valmistaminen. /34/.

Euroopan unionin hyväksymä jätteen käsittelyn tärkeysjärjestys on /34/:

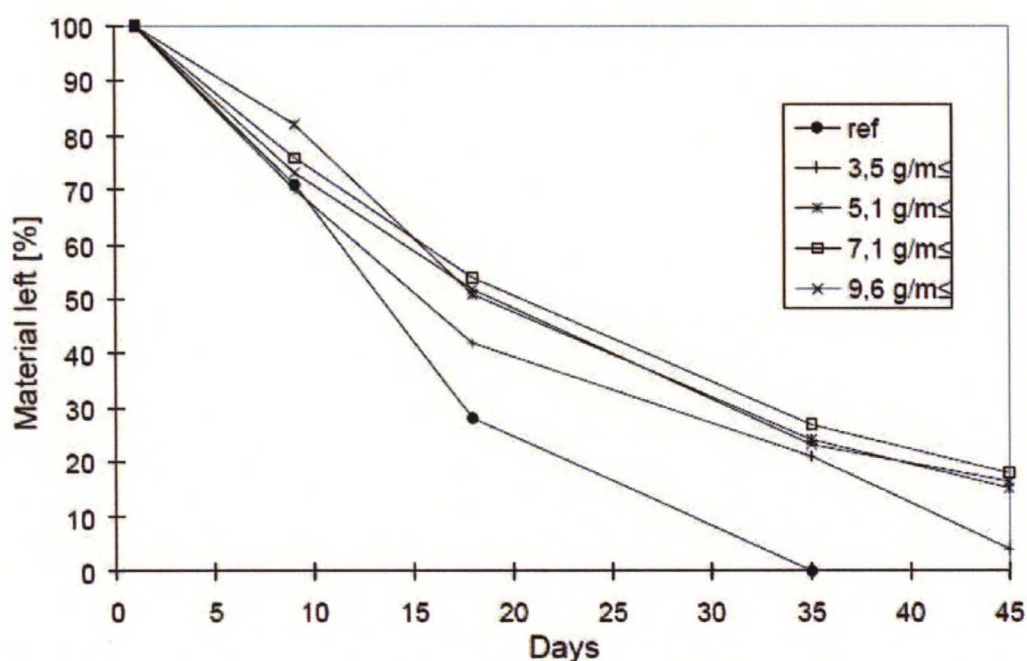
- jätteen syntymisen välttäminen
- uudelleenkäyttö
- kierrätys
- kompostointi
- energian talteenotto
- läjitys kaatopaikalle

Ensisijainen menetelmä pakkausten ympäristövaikutusten vähentämiseen olisi syntyvän jätteen vähentäminen, mikä voidaan toteuttaa monin eri keinoin. Eri materiaaleja yhdistämällä voidaan saavuttaa riittävät ominaisuudet vähemmällä materiaalimäärällä. Pakkaus voidaan myös valmistaa ohuemmasta materiaalista. Tällöin pitää varmistaa, että materiaali silti suojaa tuotetta riittävästi esimerkiksi tekemällä sekundääripakkauksesta tukevampi. Materiaalin vaihtamisella voidaan saavuttaa esimerkiksi sama lujuus pienemmällä materiaalimäärällä. /35, s. 72/.

Vähentämispyrkimyksistä huolimatta pakkauksista syntyy aina jonkin verran jätettä. Pakkausmateriaalijätteen käsittely voidaan suorittaa kierrättämällä, polttamalla tai sijoittamalla kaatopaikalle. Ennen näitä toimintoja tulee tarvittaessa suorittaa jätteen esikäsittely, jossa jäte kerätään ja lajitellaan halutunlaisiin jakeisiin. Lajittelu voidaan suorittaa joko jätteen syntypaikalla tai jätteenkäsittelylai-

toksella. /35, s. 72-73/. Pakkausmateriaalin valmistuksessa tulisi ottaa huomioon, että käytetyt painovärit, liimat ja muut raaka-aineet ovat soveltuvia kierrätysprosessiin, eivätkä sisällä esimerkiksi raskasmetalleja tai myrkyllisiä yhdisteitä. /34/.

Tavallisesti dispersiopäällystetyt tuotteet soveltuvat käytettäväksi uusiokuituna. Ne ovat myös kompostoitavia. Dispersiopäällystetyn paperin kompostoitavuutta on havainnollistettu kuvassa 5. Päällystämätön paperi hajoaa kompostiympäristössä kuukauden kuluttua. Yksipuolisesti dispersiopäällystetyn paperin hajoaminen vie puolitoista kuukautta ja kaksipuolisesti dispersiopäällystetyn noin kaksi kuukautta. Barrierpakkausten kompostoinnilla voidaan huomattavasti vähentää kaatopaikalle vietävien jätteiden määrää. /3/.



Kuva 5. Dispersiopäällystetyn paperin kompostoitavuus päällystemäärän funktiona. /3/.

Päällystämättömät ja dispersiopäällystetyt kuitupohjaiset pakkaukset voidaan toimittaa kartonginkeräykseen. Kartonginkeräykseen viedyistä kuitumateriaalista valmistetaan siistausprosessin jälkeen esimerkiksi hylsykartonkia. Kuitumateriaalin seassa oleva muu jäte, kuten pakkauksen ikkunat, erotetaan siistausprosessissa. Dispersiopäällystettä ei pyritä poistamaan prosessissa vaan se käsitellään

muotoon, jossa se voidaan ajaa paperi- tai kartonkikoneen läpi uudeksi paperiksi /3/.

Biohajoava pakkaus voidaan hävittää orgaanisessa jätteenkäsittelyssä, kuten kompostoimalla. Kompostointi voidaan katsoa orgaaniseksi kierrätykseksi /35, s. 75/. Biohajoavuus tarkoittaa materiaalin hajoamista mikrobien ja niiden tuottamien entsyymien toiminnan ansiosta. Hajoamistuotteena aerobisissa olosuhteissa syntyy vettä, hiilidioksidia ja mineraalisuoloja. Anaerobisissa olosuhteissa syntyy vettä ja hiilidioksidin lisäksi metaania. /36/.

Materiaalien biohajoavuutta voidaan tutkia altistamalla näyte erilaisissa olosuhteissa mikrobeille ja mittaamalla hiilidioksidin tuottoa tai hapen kulutusta. Mikrobit voivat testistä riippuen olla peräisin kompostista, maasta tai jätevedenpuhdistamolta. Biohajoavuus voidaan laskea, kun tiedetään näytteen sisältämän orgaanisen hiilen pitoisuus. /36/.

Syntyvä jäte voidaan hävittää myös polttamalla. Jätteen polttamisella on seuraavia hyötyjä /35, s. 76/:

- Kaupungeissa jätteenpoltto vähentää kuorma-autoliikennettä kaupungin ulkopuolella sijaitseville kaatopaikoille.
- Jätteenpoltto vähentää jätteen tilantarvetta 90 %.
- Jätteen ohjaaminen polttoon kaatopaikan sijaan vähentää kaatopaikoilta syntyvän metaanin määrää.
- Polton yhteydessä muiden aineiden, kuten raudan, talteenotto on mahdollista.
- Orgaaninen jäte muuttuu biologisesti vähemmän aktiiviseksi, mikä lisää hygieniää.
- Jätteenpoltto on suositeltavaa herkästi syttyville, haihtuville ja myrkyllisille jätteille, joita ei saa viedä kaatopaikalle.

Jätteen vieminen kaatopaikalle on ympäristön kannalta huonoin vaihtoehto. Usein se on kuitenkin halpa ratkaisu, jolloin valtionhallinto joutuu käyttämään ohjauskeinoja tehdäkseen muista jätteenkäsittelyvaihtoehdoista houkuttelevampia. EU:ssa kaatopaikkadirektiivi 99/31/EY on asettanut tavoitteet biohajoavan jätteen vähentämiselle. /35, s. 77-78/.

Muovimateriaaleille ei muutamia poikkeuksia, kuten juomapulloja, lukuun ottamatta ole olemassa kierrätysjärjestelmää. Polttoon kelpaavat muovituotteet voidaan laittaa energijätteeseen, jolloin materiaalin energia saadaan talteen. Energian talteenottoon kelpaavia muoveja ovat polyetyleenitereftalaatti (PET), polyeteeni (PE-HD ja PE-LD), polypropeeni (PP) ja polystyreeni (PS).

6.2 Lainsäädäntö

Valtioneuvoston päätöksen 962/1997 mukaan kaikki liikevaihdoltaan 0,84 miljoonaa euroa ylittävät pakkaajat ja maahantuojat ovat velvollisia huolehtimaan pakkaustensa hyötykäytöstä. EY:n pakkaus- ja pakkausjätedirektiivin 94/62/EY mukaan pakkauksia koskevat ympäristölliset perusvaatimukset ovat:

- Pakkausten valmistamiseen tulee käyttää vain se määrä materiaalia, mikä on tarpeen pakkauksen toimivuuden kannalta.
- Pakkauksissa ei saa olla raskasmetalleja yli sallittujen rajojen.
- Pakkauksissa mahdollisesti olevien haitallisten aineiden määrien on oltava niin vähäisiä, kuin mahdollista.
- Uudelleen käytettävää/täytettävää pakkausta tulee voida turvallisesti kuljettaa ja käsitellä useita kertoja.
- Pakkaus tulee voida käyttää hyödyksi joko materiaalina, energiana tai kompostina. Kaikesta syntyneestä pakkausjätteestä on ollut saatava 61 prosenttia hyötykäyttöön vuoteen 2001 mennessä.

7 KIRJALLISUUSOSAN YHTEENVETO

Johdannon taulukon 1 mukaan prosessin kaikki vaiheet asettavat erityysvaatimuksia materiaalille. Kirjallisuusosassa on pyritty selvittämään tarkemmin näitä haasteita ja pyritty löytämään niille ratkaisuja. Merkittävimmät haasteet ovat tuotteen kuivuminen varastoinnin ja kuljetuksen aikana, pakkausmateriaalien lämmönkesto, pakkausmateriaaleista syntyvät haitalliset yhdisteet, tuotteesta pakkausmateriaaliin siirtyvät aineet, kuten kosteus ja rasva sekä pakkausmateriaalin kierrätettävyys käytön jälkeen.

Konditoria- ja leipomotuotteet sisältävät rasvaa, minkä vuoksi pakkausmateriaalin tulee olla rasvankestäviä. Rasvankestävyys saadaan aikaiseksi materiaalin huokoisuuden vähentämisellä. Muovimateriaalit ovat luonnostaan rasvatiiviitä, mutta kuitumateriaaleilla rasvatiiviyys saadaan aikaiseksi joko kuitujen jauhatuksella tai materiaalin päällystämällä. Huokoisuus vaikuttaa myös materiaalin ilmanläpäisevyyteen.

Koska kyseisessä konseptissa käsitellään nimenomaan pakastettuja tuotteita, pakastamisen asettamat vaatimukset pakkausmateriaalille ovat merkittäviä. Tärkein vaatimus on vesihöyryn kulkemisen estäminen. Pakkasvarastoinnin aikana tuotteessa oleva kosteus erottuu vaihtelevan lämpötilan seurauksena. Jos vesihöyry pääsee poistumaan pakkauksesta, tuote kuivuu, jolloin sen laatu heikkenee. Materiaalien barrierominaisuudet ovat matalissa lämpötiloissa yleensä paremmat kuin korkeissa lämpötiloissa, koska materiaalin molekyyliverkosto värähtelee vähemmän päästäen läpi vähemmän ainetta.

Kuitumateriaaleilla vesihöyry- ja kosteusbarrier on heikompi, kuin muoveilla, koska kuidut ovat luonnostaan hydrofiilisiä. Vesihöyrynläpäisevyys on riippuvainen kuitumateriaalityypistä. Tiiviillä paperilajeilla vesihöyrynläpäisevyys tapahtuu kaasun diffundoitumisesta sekä huokosten kautta että kuitujen pintaa pitkin selluloosan hydroksyyliyhymien adsorboimana. Avoimemmilla paperilajeilla läpäisevyys tapahtuu pääasiassa huokosten kautta. Tämän vuoksi tiiveinkään kui-

tumateriaali ei estä riittävästi vesihöyryn kulkemista, joten kuitumateriaalit tulee päällystää barrierpäällysteellä.

Koska pakkauksessa paistaminen on olennainen osa suunniteltua konseptia, pakkausmateriaalien tulee kestää korkeita lämpötiloja. Kuitumateriaalien hajoaminen tapahtuu vähitellen lämpötilan noustessa. Alueella 150-190 °C selluloosan polymerisaatioaste laskee. 200 °C:ssa kuitujen pintoihin alkaa syntyä murtumia ja ligniinin hajoaminen alkaa. Hemiselluloosa hajoaa alueella 225-325 °C. Selluloosan hajoaminen tapahtuu 370 °C:ssa.

Hemiselluloosalla on merkittävä rooli paperin lämmönkestävyydessä. Suuri osa kuitujen välistä sitoutumisesta johtuu kuidun komponenttien hydroksoyyliryhmien mahdollistamista vetysidoksista /37/. Hemiselluloosan hajotessa vetysidosten määrä vähenee heikentäen rakennetta. Hemiselluloosa vaikuttaa myös paperin tummumiseen. Hiilihydraattien hydrolyysin lopputuotteista tiivistyy tummaa ainetta, jonka oletetaan olevan syynä paperin värin muuttumiseen.

Polymeerien, kuten selluloosan ja muovien, lämmönkesto riippuu osaltaan polymeerin kiteytymisestä. Mitä kiteytyneempi rakenne polymeerillä on, sitä korkeampaa lämpötilaa se kestää. Korkeaa lämpötilaa kestäville liima-aineilla tulee olla korkea sulamispiste ja sen tulee vastustaa hapettumista. Lämpö ei saisi aiheuttaa polymeeriketjujen katkeilua. Selluloosan ja hemiselluloosan muodostaman paperin lisäksi korkeisiin lämpötiloihin soveltuvia polymeerejä ovat polyesterit, polysulfonit ja akryylit.

Elintarvikelainsäädännön mukaan elintarvikkeen kanssa kosketukseen joutuvan materiaalin tulee olla sellainen, ettei se tee elintarviketta terveydelle vahingolliseksi tai ihmisravinnoksi sopimattomaksi. Tämä aiheuttaa suuria haasteita pakkausmateriaaleille, koska lämpötilan noustessa materiaaleista syntyvien hajoamistuotteiden todennäköisyys kasvaa. Lainsäädännön mukaan materiaalia tulee käyttää valmistajan hyväksymissä olosuhteissa. Suunnitellussa konseptissa tavoitepaistolämpötila on 220 °C. On kuitenkin otettava huomioon, että tuotteita

tullaan paistamaan useissa erilaisissa uuneissa, joiden todellinen lämpötila voi vaihdella huomattavasti. Tämän vuoksi materiaalin olisi syytä kestää suunniteltua korkeampaa lämpötilaa, jolloin voidaan olla varmoja turvallisuudesta tavoitteesta poikkeavista olosuhteista huolimatta.

Joustopakkausmateriaalien pääasialliset painomenetelmät ovat flekso- ja syväpainatus. Käytettyjen painovärien koostumus riippuu käyttötarkoituksesta. Suunniteltuun konseptiin käytettävien painovärien tulee kestää korkeita lämpötiloja eikä niistä saa aiheutua migraatiota tuotteeseen. Migraation riskiä vähennetään kuivaamalla tai polymeroimalla painoväri huolellisesti painamisen jälkeen.

Tuotteiden pakkaaminen suoritetaan joko vaaka- tai pysty-flow-pack -koneella. Pakkaamisessa kriittisiä tekijöitä ovat materiaalin kestävyys ja saumauksen onnistuminen. Saumauksen perustana on erilaisia adheesioteorioita, kuten mekaaninen adheesioteoria, diffuusioteoria, elektrostaattinen teoria, termodynaaminen adsorptioteoria ja kemiallinen adheesioteoria, joiden yhteisvaikutuksena aineiden välinen adheesio syntyy. Kuitumateriaaleja saumattaessa mekaanisella adheesiolla on merkittävä rooli. Käytetyn saumausaineen pintajännityksen ja viskositeetin tulee olla riittävän pieniä, jotta se pystyisi kastelemaan pinnan ja jotta aine tunkeutuisi vastakkaisen pinnan huokosiin riittävän nopeasti.

Saumauksessa muuttujia ovat saumauslämpötila, saumausaika, saumausleukojen paine ja saumausleukojen kuvio. Saumauslämpötilan tulee olla vähintään yhtä korkea kuin käytetyn polymeerin sulamislämpötila. Saumausajan tulee olla riittävän pitkä, jotta polymeeriketjujen päät kulkeutuvat riittävän syväälle vastakkaiseen polymeeriin. Saumausleukojen paineen tehtävänä on lisätä saumattavien pintojen välistä kontaktipinta-alaa. Ristikkäisillä leukojen kuvioinneilla saavutetaan hyvä saumautuvuus. Kuitumateriaaleilla hyvä saumautuvuus on saavutettu, kun sauman repeäminen tapahtuu pääasiassa kuitujen katkeamisena.

Materiaalit, jotka eivät luonnostaan ole kuumasaumautuvia, kuten kuitumateriaalit ja alumiini, pitää päällystää kuumasaumautuvalla päällysteellä. Päällysteet

ovat yleensä dispersiopohjaisia ja samalla niillä saadaan materiaalille erilaisia barrierominaisuuksia.

Tuotteessa tapahtuu paistamisen aikana fysikaalisia ja kemiallisia muutoksia. Merkittävimmät fysikaaliset muutokset ovat kaasun laajentuminen ja nesteen haihtuminen. Molemmat muutokset lisäävät pakkauksen sisäistä painetta, jonka tulee purkautua hallitusti. Kemiallisista reaktioista paineen lisäästä aiheuttaa hiivan toiminta, josta syntyy hiilidioksidia ja etyylialkoholia.

Euroopan unioni kannustaa jätteen syntymisen välttämiseen. Syntyvä jäte tulisi ensisijaisesti käyttää uudelleen ja kierrättää. Läjitys kaatopaikalle on vähiten suositeltava vaihtoehto. Dispersiopäällystetyt kuitutuotteet soveltuvat kierrätykseen ja kompostointiin. Muovista tehdyille pakkausmateriaaleille ei pääasiassa ole kierrätysjärjestelmää, joten tällä hetkellä paras vaihtoehto muovisen pakkausmateriaalijätteen käsittelylle on energian talteenotto.

8 KOKEELLISEN OSAN JOHDANTO

8.1 Suoritus

Kokeellinen osa alkoi saatavilla olevien materiaalien kartoituksella ja näytteiden hankkimisella. Saatujen materiaalinäytteiden soveltuvuutta suunniteltuun konseptiin testattiin kolmessa vaiheessa. Tarkoituksena oli löytää suunniteltuun konseptiin soveltuva ratkaisu karsimalla pois soveltumattomia vaihtoehtoja. Karsinnan kriteerit on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Materiaalien karsimiseen käytetyt kriteerit.

Ratamateriaalit	Kuumasaumauspäällysteet
Materiaali ei näytä laadukkaalta	Päällysteen levittäminen painokoneella on hankalaa
Materiaali ei tunnu laadukkaalta	Päällyste ei saumaudu
Materiaalista muodostuu hajua	Päällyste vaatii liian korkean saumauslämpötilan
Materiaali ei ole riittävän lujaa	Sauma ei pysy kiinni paistamisen aikana
Materiaali ei hengitä riittävästi	Päällysteestä muodostuu hajua
Materiaalin barrierominaisuudet eivät ole riittävät	
Materiaalista valmistettu pakkaus on vaikea avata	
Materiaalin painaminen on hankalaa	
Materiaali ei toimi pakkauskoneessa	
Materiaali ei ole kierrätettävää tai biohajavaa	

8.2 Tehdyt tutkimukset

8.2.1 Höyrymuodostuminen

Höyrymuodostumisen määrittämisen tavoitteena oli selvittää tuotteista paistamisen aikana muodostuvan höyryn määrää. Muodostuva höyry pitää saada poistumaan pakkauksesta, jotta vältetään pakkauksen hallitsematon repeäminen. Höyryn määrän selvittäminen auttaa arvioimaan materiaalin hengittävyyden tarvetta uunissa ja uunin jälkeen.

8.2.2 Myymäläleipomoiden ja paistopisteiden uunien lämpötilat

Myymäläleipomoiden ja paistopisteiden uunien lämpötilojen mittauksella pyrittiin selvittämään tuotteiden paistamiseen käytettävien uunien todellisia lämpöti-

loja. Erityisesti oltiin kiinnostuneita tiettyyn lämpötilaan säädettyjen uunien maksimilämpötiloista. Maksimilämpötilat tulee ottaa huomioon pakkausmateriaalin valinnassa, koska materiaalin tulee olla hyväksytty elintarvikekäyttöön kyseisessä lämpötilassa.

8.2.3 Materiaalien esitutkimus

Materiaalien esitutkimuksen tavoitteena oli tutustua materiaalien käyttäytymiseen paistamisen aikana aistinvaraisesti ja karsia pois sellaiset materiaalit, jotka ovat selkeästi soveltumattomia suunniteltuun käyttötarkoitukseen.

8.2.4 Vetolujuus, venymä ja murtotyö

Taulukossa 6 on esitetty tehdyt käsittelyt, joiden jälkeen materiaalien vetolujuudet, venymät ja murtotyöt määritettiin. Käsittelyjen tarkoituksena oli simuloida pakkausmateriaalin eri prosessivaiheiden aikana kokemia rasituksia.

Taulukko 6. Vetolujuuden määrittämisen yhteydessä materiaaleille tehdyt käsittelyt.

Ilmastointi
Kostutus
Paistaminen
Paistaminen ja kostutus
Paistaminen ja ilmastointi

Vetolujuuden mittaaminen ilmastoidusta näytteestä kertoo materiaalin standardinmukaisen vetolujuuden ja simuloi tilannetta, jossa materiaalia käytetään pakkauskoneessa.

Vetolujuuden mittaamisella kostutetusta näytteestä pyrittiin tutkimaan materiaalin kosteuden vaikutusta vetolujuuteen ja simuloimaan tilannetta, jossa pakastettu ja pakattu tuote pääsee sulamaan ja kosteus tiivistyy pakkauksen pinnalle kostuttaen materiaalin. Paperin jännitys-venymäkäyttäytyminen riippuu sen kosteuspitoisuudesta. Kuiva paperi on jäykkää ja haurasta. Kostean paperin murto-venymä on suurempi kuin kuivan paperin, mikä johtuu hemiselluloosan pehmentymisestä. /38/.

Vetolujuuden mittaaminen suoraan paistamisen jälkeen kuvaa korkean lämpötilan vaikutusta materiaalin vetolujuuteen. Lisäksi testi kertoo materiaalin kosteuspitoisuuden vaikutuksesta vetolujuuteen, koska materiaali kuivuu paistamisen aikana.

Paistamisen jälkeen kostutetun materiaalin vetolujuus kuvaa tilannetta, jossa tuote on paistettu pakkauksessaan ja on asetettu myyntiin. Lämpimästä tuotteesta muodostuva vesihöyry kostuttaa materiaalia.

Vetolujuuden mittaaminen uunin jälkeen ilmastoidusta materiaalista kertoo, kuinka vetolujuus palautuu korkean lämpötilan aiheuttamasta rasituksesta. Menetelmällä voidaan arvioida korkeassa lämpötilassa tapahtuvien palautumattomien muutosten määrää materiaalissa.

8.2.5 Puhkaisulujuus

Puhkaisulujuuden mittaus suoritettiin samanlaisten käsittelyjen jälkeen kuin vetolujuuden mittaus. Näin saatiin käsitys eri prosessivaiheiden vaikutuksesta puhkaisulujuuteen sekä korkean lämpötilan vaikutuksesta materiaaliin.

8.2.6 Ilmanläpäisevyys

Ilmanläpäisevyyttä voidaan käyttää materiaalin barrierominaisuuksien tutkimiseen, koska ilmanläpäisevyys on verrannollinen materiaalin huokoisuuteen. Useat barrierominaisuudet, kuten rasvanläpäisevyys, ovat riippuvaisia materiaalin huokoisuudesta. Ilmanläpäisevyys kertoo lisäksi materiaalin hengittävyyydestä paistamisen aikana.

8.2.7 Materiaalien tummuminen paistettaessa

Materiaalien tummumisen mittaamisella paistamisen aikana pyrittiin selvittämään materiaalien tummumista paistolämpötilan funktiona sekä mahdollisia eroja materiaalien tummumisessa. Tummumisella on merkitystä siihen, miltä pakkaus näyttää paistamisen jälkeen. Liikaa tummunut pakkaus voi antaa kuluttajalle mielikuvan palaneesta tuotteesta, vaikka itse tuote voi olla moitteeton.

8.2.8 Testaus pilot-mittakaavassa

Pilot-mittakaavan testauksen pääasiallinen tarkoitus oli tutkia käytetyistä materiaaleista valmistettujen pakkausten käyttäytyminen paistamisen aikana ja paistamisen jälkeen. Testissä voitiin erityisesti tarkkailla käytettyjen kuumasauhauspäälysteiden soveltuvuutta suunniteltuun pakkauskonseptiin.

8.2.9 Testaus tuotantomittakaavassa

Tuotantomittakaavan testauksen tarkoituksena oli tutkia materiaalien käsiteltävyyttä painokoneessa ja ajettavuutta pakkauskoneessa eli toimivuutta todellisissa olosuhteissa. Lisäksi selvitettiin painokoneella käsiteltyjen näytteiden ominaisuuksia, kuten painatuksen laatua, painovärin muuttumista ja päälysteen vaikutusta materiaalien barrierominaisuuksiin.

9 KÄYTETYT MATERIAALIT

9.1 PET-muovi

PET-muovi (polyetyleenitereftalaatti) on polyesteri, jota syntyy etyyliglykolin ja tereftaalihapon reaktiossa. Pakkausteollisuudessa sitä käytetään pääasiassa juomapulloissa, kalvoissa ja vuoissa. /5, s. 196/.

PET-muovia syntyy polykondensaation tuloksena. Polykondensaatiossa monomeerien reaktiossa liittymiskohdasta irtoaa jokin pienimolekyylinen aine, kuten vesi. Polykondensaatio tapahtuu aina jonkin muun kuin hiiliatomin avulla. /20, s. 26/.

PET-muovia voidaan valmistaa amorfisena tai osakiteisenä. Amorfisessa aineessa sisäinen rakenne on järjestymätön, kun taas kiteisessä materiaalissa atomit tai atomiryhmät järjestyvät tietyn säännön mukaisesti sidosvoimien vaikutuksesta. Käytännössä täysin kiteistä muovia ei voida valmistaa, minkä vuoksi puhutaan amorfisesta ja osakiteisestä muovista. /20, s. 41/.

Koska kiteytyminen vaikuttaa molekyylien liikemahdollisuuksiin, suuri osa muovien ominaisuuksista on selitettävissä kiteisyyden avulla. Amorfinen PET-muovi soveltuu tyhjiömuovaukseen, koska lämmitysaika on lyhyt ja esikuivausta ei tarvita. Tuote kutistuu vain vähän ja tasaisesti. /20, s. 42/.

Amorfinen PET-muovi voidaan kiteyttää lämmittämällä se yli 150 °C lämpötilaan. Kiteytymisessä molekyylit pakkautuvat lähemmäs toisiaan, jolloin muovi muuttuu maidonvalkoiseksi. Samalla muovi kutistuu. Kiteytynyt PET on lujempaa, kovempaa, jäykempää sekä kestää paremmin lämpöä ja kemikaaleja. /20, s. 42/.

PET-kalvot valmistetaan joko valamalla tai puhaltamalla ja niiden orientaatio on kaksiakselinen. Kalvojen ominaisuudet vaihtelevat, mutta yleisesti PET-kalvoilla on suuri vetolujuus, pieni venymä, korkea sulamislämpötila, erinomainen rasva- ja öljybarrier, matala kaasunläpäisevyys, kohtalainen kosteudenläpäisevyys, hy-

vät painatusominaisuudet, laaja käyttölämpötila-alue, korkea iskulujuus ja hankauksenkestävyys sekä erinomainen mittapysyvyys. PET-kalvojen käyttöä rajoittavia tekijöitä ovat heikko kuumasaumautuvuus, taipumus keittää staattista sähköä ja huono pakkauksen avattavuus. Kuumasaumautuvuutta voidaan parantaa päällystämällä kalvo jollain kuumasaumautuvalla päällysteellä. /5, s.197/. Polyesterikalvoilla on taipumus revetä helposti, kun alkurepeämä on tehty /5, s.297/.

PET-kalvoa käytetään laminaateissa tai ekstruusiopäällystettynä kalvona soveluksissa, joissa tarvitaan hyviä barrier-ominaisuuksia, korkeaa lujuutta ja/tai lämmönkestoä. Lämmönkesto ja mikroaaltojen läpäisykyky tekevät PET-kalvosta ihanteellisen materiaalin käytettäväksi sekä mikroaalto- että sähköuunissa. /5, s.197/.

Tässä työssä käytetty PET-muovi on rei'itettyä kalvoa, jonka paksuus on 12 µm ja tiheys 1,39 g/cm³. Rei'ityksen reikäkoko on 0,3 mm ja reikien väli 2,5 mm. Valmistajan ilmoituksen mukaan kalvo kestää 220 °C:ssa 15 minuuttia. Kuumasaumauksen lämpötila-alue on 270-290 °C.

9.2 Sellofaani

Sellofaani on valmistettu regeneroidusta selluloosasta. Se on usein pinnoitettu nitroselluloosalla, PVDC tai vinyylikloridi/vinyyliasetaatti kopolymeerillä. Sellofaani sopii tuotteisiin, joissa tarvitaan sen erityisominaisuuksia /39, s. 131; 40, s. 160-161/:

- Helppo avattavuus
- Helppo leikattavuus ja saumattavuus
- Korkea kiilto
- Korkeiden lämpötilojen kestävyys
- Hyvä kosteudenläpäisevyys
- Päälystettynä kuumasaumattavuus sekä hyvä barrier kosteudelle ja hapelle
- Biohajoavuus

Sellofaanin käytön yleistymistä hidastavat korkea hinta, huono pakkasenkestävyys, kosteuteen reagointi sekä raskas ja saastuttava valmistusprosessi. Sellofaanilla on tällä hetkellä vain yksi valmistaja maailmassa. /40, s. 160-161/.

Sellofaani on valmistettu puhtaasta sellusta liuottamalla se hiilidisulfidiin ja lisäämällä natriumhydroksidia, jolloin saadaan viskoosia. Geelimäisen materiaalin annetaan ”kypsyä” joitakin päiviä, minkä jälkeen se ajetaan kapean raon läpi rummulle, jossa se stabiloidaan rikkihapolla. Tämä regeneroi kalvon koaguloimalla viskoosiliuoksen. Materiaali pestään ja sen jälkeen plastisoidaan lisäämällä etyleeniglykolia tai propyleeniglykolia. Syntynyt materiaali on erittäin herkkää kosteudelle, minkä vuoksi se usein päälystetään käyttämällä nitroselluloosaa tai PVdC barrier/kuumasaumauspäälystettä. /39, s. 132/.

Käytetty sellofaani on päälystetty molemmiin puolin tuntemattomalla, puoliläpäisevällä päälysteellä. Kalvon paksuus on 23,3 µm ja tiheys 1,44 g/cm³. Valmistajan mukaan kalvo kestää 200 °C:ssa 30 minuuttia. Kuumasaumauksen lämpötila-alue on 100-160 °C.

9.3 Paperi ja kuumasaumautuva päälyste

9.3.1 Tiivispaperi

Tiivispaperi on valmistettu voimakkaasti jauhatetusta kemiallisesta massasta. Jauhatuksessa kuidut fibrilloituvat, turpoavat ja niiden rakenne romahtaa, mikä lisää kuitujen välistä kosketuspintaa. Massasta syntyvän paperin rakenne on kerrostunut ja monimutkainen. Monimutkaisuus on merkittävä tekijä barrierominaisuuksien kannalta /41/. Kalanterointi ja pintaliimaus lisäävät paperin barrieromi-

naisuuksia tiivistämällä paperia ja sulkemalla paperin rakennetta. Tiivispaperia valmistavia koneita ajetaan hitaalla nopeudella, jotta vedenpoisto olisi riittävää. Voimakas massan jauhatus vähentää paperin huokosia, joiden halkaisija on 0,1-10 μm . Suurin osa tiivispaperin huokosista on suuria pintahuokosia, jotka eivät ulotu arkin läpi. /42/.

Tiivispaperin tärkein toiminnallinen ominaisuus on sen rasvan ja öljynkestävyys, mikä johtuu paperin sulkeutuneesta rakenteesta. Tiivispaperin barrier kaasuja vastaan on kuitenkin huono, koska pienet kaasumolekyylit pääsevät kulkemaan pienistäkin huokosista. Lisäksi selluloosa on hydrofiilistä, minkä vuoksi tiivispaperi estää heikosti vesihöyryn läpäisyä. Tiivispaperin barrierominaisuuksia voidaan parantaa päällystyksellä. Päällyste tukkii pienet huokokset, joiden kautta kulkeutuminen tapahtuu. Dispersiopäällystettyjen tiivispapereiden kaasunläpäisevyys on erittäin pieni. /8, s. 2, 41-43/.

Koska tiivispaperin valmistuksessa suoritettava voimakas massan jauhatus vaatii paljon energiaa, suuri osa tiivispaperin valmistuskustannuksista koostuu energiakustannuksista. Lisäksi voimakkaasti jauhetun massan vedenpoisto paperikoneella on hidasta, jolloin massa jää kosteammaksi, mikä lisää energiantarvetta kuivatusosalla. /8, s. 3/.

Tutkimuksessa käytetty tiivispaperi oli silikonoimatonta leivinpaperia, jonka neliömassa oli valmistajan ilmoituksen mukaan 57 g/m^2 . Mitattu neliömassa oli 59,0 g/m^2 . Paperi on valmistettu pitkäkuituisesta havupuusellusta. Valittu laji on neliömassaltaan suurin saatavilla oleva tiivispaperi kyseiseltä valmistajalta.

9.3.2 MG-paperi

Tutkimuksessa käytetty MG-paperin (machine glazed) neliömassa oli valmistajan ilmoituksen mukaan 50 g/m^2 . Mitattu neliömassa oli 51,1 g/m^2 . Paperi oli valkaistua ja konekalanteroitua. Sen toinen puoli oli kiiltävä ja toinen matta. Paperi on valmistettu pohjoismaisesta havupuusta valmistetusta kemiallisesta massasta.

9.3.3 Kuumasaumauspäälyste

Työssä tutkittiin kolmen kuumasaumauspäälysteen soveltuvuutta käytettäväksi uunissa. Käytetyt päälysteet olivat päälyste 1, päälyste 2 ja päälyste 3.

Päälyste 1 on kloorivapaa kuumasaumauspäälyste, joka perustuu synteettisiin hartseihin. Päälyste on varsinaisesti tarkoitettu käytettäväksi normaalin lämpötilan sovelluksissa, kuten jogurttipurkkien kansien saumaamisessa. Päälystettä käytettiin etyyliasetaattiliuoksena.

Päälyste 2 perustuu PET-polymerin vesidisersion ja sen kuiva-ainepitoisuus on valmistajan ilmoituksen mukaan noin 30 %. Päälyste 3 on myös dispersiopohjainen, mutta sen sisältämä polymeeri ei ole tiedossa.

9.4 Dispersiopäälystetty paperi

Dispersiopäälystyksessä paperin pinnalle annostellaan pienien polymeeripartikkelien vesidisersiona, lateksia, joka muodostaa kuivuttuaan kiinteän pinnan. Tiiviillä partikkeli kerroksella on barrierikyky, joka riippuu polymeeridisersion koostumuksesta. Dispersiopäälystyksessä partikkelit eivät tavallisesti sulaudu yhteen vaan pakkautuvat kiinni toisiinsa. /3/.

Dispersiopäälystys voidaan suorittaa useilla eri menetelmillä. Päälystyslaitteen tulee pystyä applikoimaan päälyste, annostelemaan sitä oikea määrä, kuivata se ja lopuksi jäädyttää se ennen kiinnirullausta tai pinoamista. /3/.

Barrieridisersion koostuvat joko veteen liukenemattomista komonomeereistä, kuten metyyli metakrylaatista, butyyliakrylaatista ja styreenistä, tai vesiliukoisista komonomeereistä, kuten akryylihaposta ja metakryylihaposta. Vesiliukoisten komonomeerien konsentraatio on usein matala. Polymerien molekyylimassat voivat vaihdella 100000:sta yli miljoonaan. Dispersio voi koostua polymeereistä, joilla on eri molekyylimassoja. On myös mahdollista tehdä polymeerejä, joiden ytimen rakenne on erilainen kuin kuoren. Tällaisten polymerien lasittumislämpötila voidaan säätää käyttötarkoituksen mukaan sopivaksi. /3/.

Kovemmat polymeerit antavat yleensä paremmat barrierominaisuudet, mutta vaativat kuumasaumattaessa korkeamman lämpötilan ja saumausajan. Suuri päällystemäärä parantaa yleensä dispersiopäällysteen saumautuvuutta. /3/.

Käytetty dispersiopäällystetty paperi koostuu 90 g/m² pohjapaperista, joka on päällystetty toiselta puolelta kuumasaumautuvalla akrylaattipohjaisella dispersiopäällysteellä. Päällystemäärä on 15 g/m². Valmistajan ilmoituksen mukaan päällyste kestää 260 °C lämpötilaan asti ja päällysteellä on elintarvikehyväksyntä käytettäväksi 220 °C lämpötilassa 30 minuuttia.

Käytetty pohjapaperi on tarkoitettu vain tutkimusta varten, koska sillä ei ole elintarvikehyväksyntää. Materiaalin osalta voidaan tutkia päällysteen soveltuvuutta suunniteltuun konseptiin. Lopullinen pohjapaperi päätetään tutkimustulosten perusteella. Pohjapaperin neliömassa olisi tarkoitus olla noin 60 g/m², joka on valmistajan ilmoituksen mukaan käytännön minimi päällystyskoneen ajettavuuden kannalta.

9.5 PET-paperi -laminaatti

Laminoinnilla voidaan yhdistää kaksi erilaista ratamateriaalia yhteen ja näin esimerkiksi tehdä ohuempia rakenteita tai parantaa lopputuotteen barrierominaisuuksia. Laminointi voidaan suorittaa vaha-, ekstruusio-, märkä- tai kuivalaminointina tai liuottimettomana laminointina. Materiaaleina voidaan käyttää kuitumateriaaleja, muovikalvoja sekä alumiinifoliota. /44/.

Tutkitussa PET-paperi -laminaatissa on käytetty valkaistua ja konekalanteroitua kraft-paperia, jonka neliömassa on 50 g/m², ja PET-kalvoa, jonka paksuus on 12 µm. Käytetty laminointimenetelmä ja laminointiliiman koostumus eivät ole tiedossa.

10 TUTKIMUSMENETELMÄT

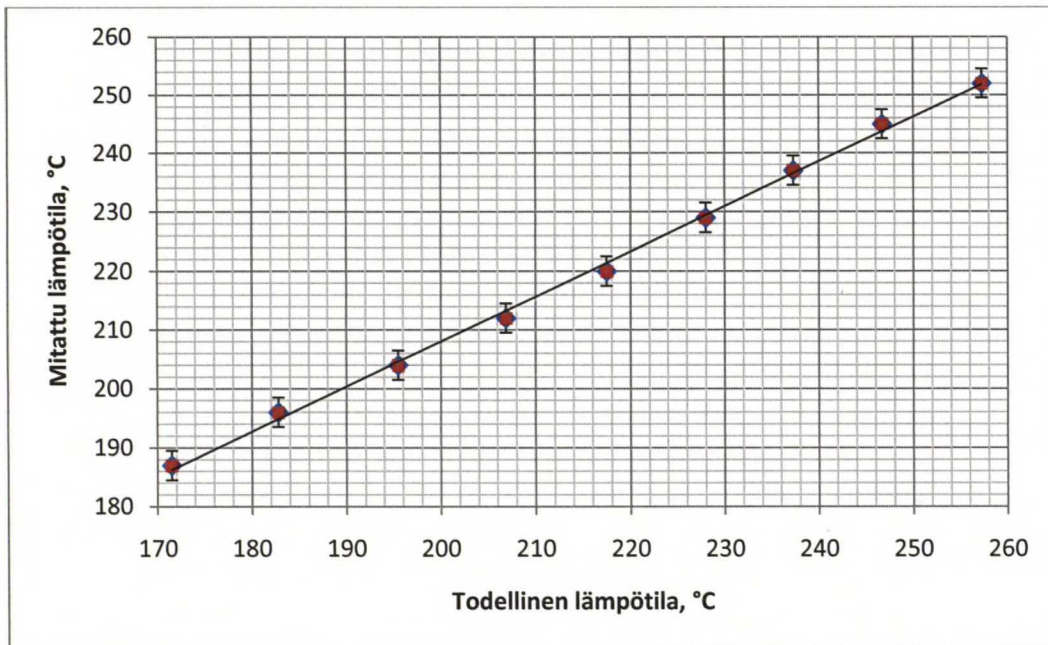
10.1 Höyrynmuodostuminen

Tuotteiden höyrynmuodostumista paistamisen aikana tutkittiin paistamalla tuotteita kymmenen minuuttia 210 °C:ssa ja punnitsemalla tuotteet ennen ja jälkeen paistamisen sekä 15 minuuttia paistamisesta. Käytetty uuni oli kiertoilmauuni, jollaista käytetään myymäläleipomoissa ja paistopisteissä. Uunin lämpötila voitiin asettaa noin viiden asteen tarkkuudella. Asetusarvolla 210 °C uunin lämpötila vaihteli välillä 193-209 °C. Testaukseen käytetyt tuotteet olivat tumma spelttileipä, kauravarras, mahtileipä sekä calzone-pizza. Mittauksista tehtiin kolme rinnakkaismäärittystä.

Uunin pyörivän hyllystön vuoksi lämpötilan mittaamiseen käytettiin analogista lämpömittaria, joka oli kalibroitu alueella 170-255 °C käyttäen apuna Amprobe TMD90A termoparilämpömittaria ja R/S tyyppin anturia sekä Select-Horn muhveliunua. Analogisen lämpömittarin lukema voitiin lukea noin viiden asteen tarkkuudella. Termoparilämpömittarin tarkkuus oli 0,1 °C. Analogisen lämpömittarin näyttämän arvon lämpötilariippuvuus on esitetty kuvassa 6. Mittauspisteisiin sovitettiin pienimmän neliösumman menetelmällä suora, jonka yhtälö on:

$$\frac{T_m}{T^0} = 0,7647 \cdot \frac{T}{T^0} + 55,098 \quad (13)$$

jossa	T_m	on	mitattu lämpötila
	T	on	todellinen lämpötila
	T^0	on	1 °C



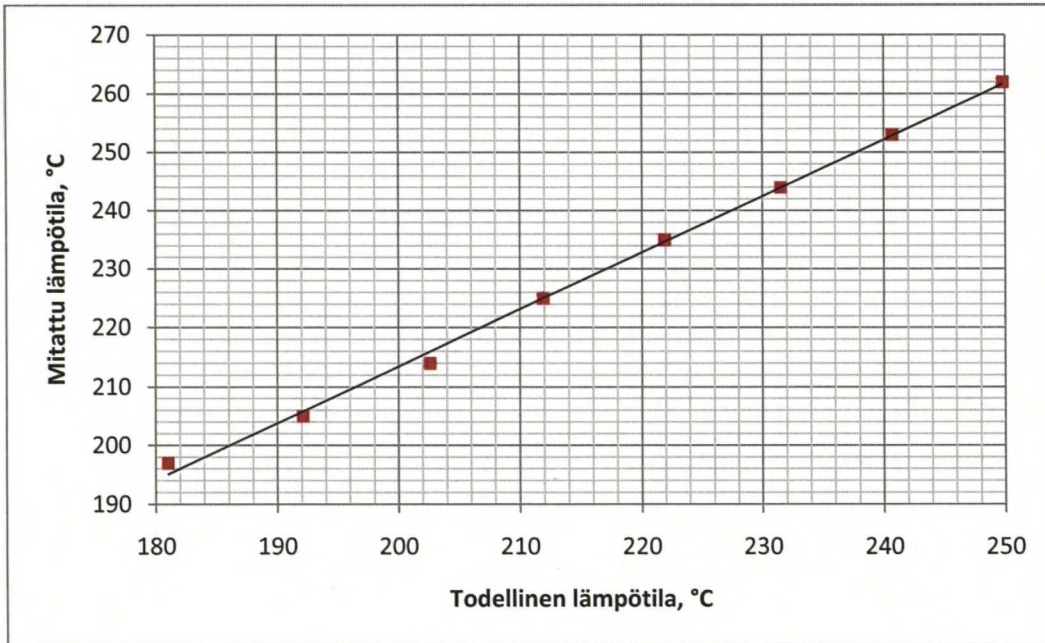
Kuva 6. Uunin lämpötilan mittaamiseen käytetyn lämpömittarin lämpötilariippuvuus. Käytetyt virherajat todelliselle lämpötilalle ovat $\pm 0,05$ °C ja mitatulle lämpötilalle $\pm 2,5$ °C.

10.2 Myymäläleipomoiden ja paistopisteiden uunien lämpötilat

Uunien lämpötilat mitattiin kolmen eri myymäläleipomon pinnavaunu-uuneista. Lämpötilan mittaamiseen käytettiin digitaalista uunilämpömittaria. Lämpömittari ilmoittaa mitatun lämpötilan yhden celsiusasteen tarkkuudella. Käytetty lämpömittari kalibroitiin alueella 181-250 °C samalla tavoin kuin käytetty analoginen lämpömittari kohdassa 10.1. Lämpömittarin näyttämän arvon lämpötilariippuvuus on esitetty kuvassa 7. Mittauspisteisiin sovitettiin pienimmän neliösumman menetelmällä suora, jonka yhtälö on:

$$\frac{T_m}{T^0} = 0,9669 \cdot \frac{T}{T^0} + 20,093 \quad (14)$$

jossa T_m on mitattu lämpötila
 T on todellinen lämpötila
 T^0 on 1°C



Kuva 7. Uunien lämpötilojen mittaamiseen käytetyn lämpömittarin lämpötilariippuvuus. Käytetyt virherajat todelliselle lämpötilalle ovat $\pm 0,05^\circ\text{C}$ ja mitatulle lämpötilalle $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Mitatut uunit lämmitettiin asetusarvoon 220°C ja lämpömittarin anturi asetettiin uuniin. Anturi pyrittiin sijoittamaan mahdollisimman kauas uunin oviaukosta. Käytettyjen uunien lämpötilansäätö toimii termostaatin ohjaamana, minkä vuoksi lämpötila vaihtelee asetusarvon molemmiin puolin. Anturia pidettiin uunissa niin kauan, että uunin lämpötila kääntyi laskuun termostaatin katkaistua lämmityksen. Suurin saavutettu lämpötila kirjattiin ylös. Anturin sijaintia muuttamalla pyrittiin löytämään paikka, jossa saavutetaan suurin lämpötila. Anturin paikkaa uunissa rajoitti soveltuvien sijoituspaikkojen rajallinen määrä. Tuotteet paistetaan pinnavaunu-uuneissa pyörillä varustetuissa vaunuissa, jotka pyörivät paistamisen aikana. Tämän vuoksi johdolla varustettua anturia ei voitu sijoittaa vau-
 nun paistotasoille vaan anturille pyrittiin löytämään paikka uunin seinustoilta.

10.3 Materiaalien esitutkimus

Käytettyjen materiaalien ulkonäköä ja tuntumaa tarkasteltiin ennen uunia ja uunin jälkeen. Testi suoritettiin materiaaleja silmämääräisesti tarkastelemalla ja käsin tunnustelemalla.

Materiaalin paistaminen uunissa suoritettiin sijoittamalla pala materiaalia kohdassa 10.1 esiteltyyn uuniin, joka oli asetettu 220 °C lämpötilaan. Asetusarvolla 220 °C uunin lämpötila vaihteli välillä 200-218 °C. Materiaalia pidettiin uunissa kymmenen minuuttia, jonka jälkeen materiaalin tuntumaa, ulkonäköä ja hajua tarkasteltiin aistinvaraisesti.

Testin perusteella valittiin jatkotutkimuksiin materiaalit, joiden ominaisuudet vaikuttivat sopivilta ja hylättiin materiaalit, joiden lujuus, tuntuma, ulkonäkö tai haju ei sovellu käytettävään konseptiin.

10.4 Vetolujuus, venymä ja murtotyö

Materiaalien vetolujuus, venymä ja murtotyö mitattiin eri tavoin käsitellyille näytteille. Vetolujuudet mitattiin kone- ja poikkisuunnassa standardin ISO-1924-2 mukaisesti tehden kymmenen rinnakkaismäärittystä. Samalla saatiin materiaalin murtovenymän ja murtotyön arvo. Materiaalin vetolujuus kuvaa materiaalin kykyä vastustaa suoraa vetoa ennen murtumistaan. Materiaalin venymä kuvaa materiaalin joustavuutta. Materiaalin murtotyö kertoo, kuinka paljon fysikaalista työtä tarvitaan materiaaliliuskan murtamiseen.

Ilmastointi suoritettiin standardin ISO 187 mukaisesti neljän tunnin ajan 23 °C lämpötilassa ja 50 % ilman suhteellisessa kosteudessa.

Kostutus suoritettiin asettamalla näytteet olosuhdekaappiin, jonka lämpötila oli 23 °C ja ilman suhteellinen kosteus 95 %, ja pitämällä niitä kaapissa neljän tunnin ajan. Kostutuksen jälkeen näytteet suljettiin kuivumisen estämiseksi muovipussiin ja kuljetettiin mitattavaksi.

Paistaminen suoritettiin lämpökaapissa, joka asetettiin 220 °C lämpötilaan. Lämpökaapin lämpötila tarkastettiin kohdassa 10.1 esitellyllä lämpömittarilla. Asetusarvolla 220 °C lämpökaapin todellinen lämpötila on 229-235 °C (± 5 °C). Näytteitä pidettiin lämpökaapissa kymmenen minuuttia. Paistamisen jälkeen näytteet sijoitettiin eksikaattoriin uudelleenkostumisen estämiseksi.

10.5 Puhkaisulujuus

Materiaalin puhkaisulujuus tarkoittaa suurinta kohtisuoraa painetta, jonka se kestää murtumatta. Puhkaisulujuus mitattiin standardin SCAN-P 24:99 mukaisesti tekemällä viisi rinnakkaismäärittystä materiaalin kummaltakin puolelta. Koejärjestelyt olivat samanlaiset vetolujuuden määrittelyn kanssa, eli materiaali mitattiin viidellä eri tavalla käsiteltynä.

10.6 Ilmanläpäisevyys

Materiaalien ilmanläpäisevyys mitattiin standardin SCAN-P 60:87 mukaan 23 °C lämpötilassa ja 50 % ilman suhteellisessa kosteudessa. Näytteistä tehtiin kymmenen rinnakkaismäärittystä samalta puolelta.

10.7 Materiaalien tummuminen paistettaessa

Materiaalien tummumista paistamisen aikana testattiin pitämällä materiaaleja uunissa eri lämpötiloissa kymmenen minuuttia ja mittaamalla densitometrillä paperin Lab-värikoordinaatiston mukainen kirkkausarvo (L, lightness). Mittaus suoritettiin Vipdens 2000 densitometrillä standardin ISO 13655 mukaisesti. Testauksessa käytetyt lämpötilat olivat välillä 199-246 °C noin kymmenen asteen välein.

CIE $L^*a^*b^*$ on väriavaruus, joka kattaa kaikki ihmissilmän havaitsemat värit. Yleisesti CIE $L^*a^*b^*$ -väriavaruutta tarkoitetaan, kun puhutaan Lab-koordinaatistosta. Avaruus koostuu kolmesta koordinaatista: L^* , a^* ja b^* . L^* kuvaa värin vaaleutta ja saa arvon välillä 0-100 siten, että nolla on musta ja sata on valkoinen. a^* -koordinaatin negatiiviset arvot ilmaisevat vihreää ja positiiviset

magentaa väriä. b^* -koordinaatin negatiiviset arvot ilmaisevat sinistä ja positiiviset keltaista väriä.

10.8 Testaus pilot-mittakaavassa

10.8.1 Esivalmistelut

Tiivispaperin pilot-mittakaavan testi valmisteltiin käsittelemällä tiivispaperi päällysteellä 1 kuumasautuvuuden saavuttamiseksi. Samalla pystyttiin testaamaan kyseisen päällysteen soveltuvuus korkeisiin lämpötiloihin. Käsittely suoritettiin levittämällä kuumasauuspäällystettä pensselillä A3-paperiarkkien reuna-alueille, joiden haluttiin saumautuvan. Ikkunan toimimista pakkauksessa testattiin leikkaamalla osaan arkeista reikä, levittämällä kuumasauuspäällystettä reiän ympärille ja asettamalla kohtaan pala rei'itettyä PET-kalvoa. Kuumasauuspäällysteen annettiin kuivua vetokaapissa yön yli. Ennen pakkauksen valmistamista ikkunan kiinnipysyminen varmistettiin saumaamalla ikkunan reumat kiinni kuumasauuspäällysteeseen.

MG-paperin kuumasautuvuus saavutettiin käsittelemällä A4-arkkeja päällysteillä 2 ja 3, jolloin voitiin samalla testata päällysteiden soveltuvuus korkeisiin lämpötiloihin. Päällystettä levitettiin arkkien reuna-alueille pensselillä. Arkkien annettiin kuivua ennen jatkokäsittelyä.

10.8.2 Pakkausten valmistaminen

Pakkaukset saumattiin käyttäen yksinkertaista käsisaumainta, jossa on jatkuvalämmitteinen saumausleuka. Käytetyn saumaimen saumauslämpötila on valmistajan ilmoituksen mukaan 180 °C (± 5 °C). Saumausaika ja saumaspaine olivat laitteen toimintaperiaatteen vuoksi riippuvaisia laitteen käyttäjästä ja saattoivat vaihdella suuresti. Käytetty saumausaika oli arviolta 2-5 s. Saumaimen tekemä sauma oli leveydeltään noin 2 mm. Pakkauskoneen tekemä sauma on leveydeltään 10-15 mm, joten käsisaumaimella tehty sauma on huomattavasti pakkauskoneen saumaa kapeampi.

Pakkauksen valmistuksessa tuote asetettiin materiaalin sisään ja materiaali saumattiin umpinaiseksi pussiksi tuotteen ympäriltä. Syntyneen pussin saumat tarkastettiin käsin saumautumattomien kohtien varalta. Tuotteina käytettiin erilaisia esipaistettuja leipomotuotteita, kuten calzone-pizzoja, pullia, viinereitä ja patonkeja.

10.8.3 Paistaminen

Tuotetta paistettiin pakkauksessaan kymmenen minuuttia 220 °C lämpötilassa kuten kohdan 10.3 testissä. Pakkauksen käyttäytymistä tarkkailtiin paistamisen aikana. Kun pakkaus oli otettu pois uunista, sen ulkonäköä, tuntumaa ja mahdollisia hajuja tarkasteltiin aistinvaraisesti. Myös pakkauksen rakennetta tutkittiin mahdollisen sauman pettämisen varalta.

10.9 Testaus tuotantomittakaavassa

10.9.1 Käsittely painokoneessa

Tiivispaperi ja MG-paperi käsiteltiin painokoneella levittämällä toiselle puolelle kuumasaumauspäällyste ja painamalla toiselle puolelle tekstiä sekä graafisia elementtejä sisältävä painatus. Painaminen suoritettiin fleksopainokoneella, jossa oli kymmenen painoyksikköä. Kuumasaumauspäällysteenä käytettiin päällyste 2:ta. Päällyste annosteltiin käyttäen kahta erilaista rasteritelaa. Telojen antavuudet olivat 18 ja 34 g/cm³. 34 g/cm³ tela oli antavuudeltaan suurin käytettävissä ollut. Tiivispaperille päällystettä levitettiin ainoastaan saumattaville reunalueille. MG-paperille päällystettä levitettiin 18 g/cm³ telalla paperin reunalueille ja 34 g/cm³ kauttaaltaan. Päällyste levitettiin MG-paperin karkeammalle puolelle paino-ohjeistuksen puutteellisuuden vuoksi. Paperin sileä puoli olisi ollut parempi pohja päällysteelle erityisesti barrierominaisuuksien kannalta. Taulukossa 7 on esitetty käytetyt materiaaliyhdistelmät ja päällysteen levitystavat.

Taulukko 7. Kuumasaumauspäälysteen levitystavat.

Rasteritela	Tiivispaperi	MG-paperi
18 g/cm ³	Reunoille	Reunoille
34 g/cm ³	Reunoille	Kauttaaltaan

Materiaaleille ajettu painatus käsitti Fazer-logon, tuoteselostetta vastaavaa tekstiä, viivakoodin sekä kohdistusmerkin. Painatus on esitetty kuvassa 8. Logon, tekstin ja viivakoodin tarkoituksena on tarkastella painotyön laatua ja luettavuutta. Kohdistusmerkki kertoo pakkauskoneelle, mistä kohtaa rata tulee saumata ja katkaista. Kohdistusmerkistä voidaan lisäksi suorittaa värinmittaus densitometrillä. Painatus suoritettiin yksivärisenä käyttäen PMS -värikartan sävyä 288 (sininen).



Kuva 8. Materiaaleille ajettu painatus. Painatus on vain malli eikä sen sisältö kuvaa lopullisen tuotteen koostumusta tai ominaisuuksia.

Papereille siirtyneet päälystemäärät mitattiin leikkaamalla paperista tietty määrä samankokoisia arkkeja ja punnitsemalla arkit. Ennen punnitusta arkit oli ilmas-toitu neljän tunnin ajan 23 °C lämpötilassa ja 50 % ilman suhteellisessa kosteu-
dessa. Kun arkkien massa, pinta-ala ja määrä tunnetaan, paperin neliömassa saadaan yhtälöstä

$$g = \frac{m}{An} \quad (15)$$

jossa	g	on	paperin neliömassa (g/m ²)
	m	on	arkkien kokonaismassa (g)
	A	on	arkkien pinta-ala (m ²)
	n	on	arkkien määrä

Päällystetyn ja päällystämättömän paperin neliömassojen erotuksesta saadaan päällysteen neliömassa.

Painokoneella käsiteltyjen materiaalien saumautuvuus testattiin käsisaumaimella ennen koeajoa pakkauskoneessa. Lisäksi materiaalit koepaistettiin uunissa materiaalien ulkonäön ja erityisesti päällysteen tummumisen testaamiseksi.

10.9.2 Painatuksen laatu

Painatuksen laatua tutkittiin ottamalla mikroskoopilla 200-kertaiset suurennokset paistamattomien ja paistettujen materiaalien painatuksista. Suurennoksista pyrittiin havaitsemaan painatuksen tarkkuuden lisäksi painovärisä tapahtuvia muutoksia paistamisen aikana. Paistaminen suoritettiin pitämällä näytteitä 220 °C lämpötilaan asetetussa kohdassa 10.4 esitellyssä lämpökaapissa kymmenen minuuttia.

10.9.3 Painovärin muuttuminen paistettaessa

Painovärin muuttumista paistamisen aikana tutkittiin mittaamalla materiaaleihin painettujen kohdistusmerkkien värit densitometrillä ennen ja jälkeen paistamisen. Näytteitä pidettiin 220 °C lämpötilaan asetetussa kohdassa 10.4 esitellyssä lämpökaapissa kymmenen minuuttia. Mittaukset suoritettiin Vipdens 2000 densitometrillä standardin ISO 13655 mukaisesti.

10.9.4 Päällysteen vaikutus materiaalin ilmanläpäisevyyteen

Päällystettyjen materiaalien ilmanläpäisevyydet mitattiin standardin SCAN-P 60:87 mukaan 23 °C lämpötilassa ja 50 % ilman suhteellisessa kosteudessa. Näytteistä tehtiin kymmenen rinnakkaismääritystä samalta puolelta.

10.9.5 Koeajo pakkauskoneessa

Koeajon tavoitteena oli tutkia materiaalien ajettavuutta ja saumautuvuutta pakkauskoneessa. Käytetty pakkauskone oli Record Jaguar vaaka-flow-pack -kone (kuva 9). Pakkauskoneessa saumaus suoritettiin pitkittäissauman osalta jatkuvalämmitteisillä saumauspyörillä ja poikittaissauman osalta liikkuvilla saumausleuoilla, jotka seuraavat saumaushetkellä pakkauksen mukana pidentäen saumausaikaa. Materiaalin siirto pakkauskoneessa tapahtuu ennen saumauspyöriä olevien vetopyörien välityksellä.



Kuva 9. Record Jaguar vaaka-flow-pack -kone. /45/.

Koeajosta pyrittiin tekemään havaintoja, joiden perusteella voidaan päätellä, soveltuvatko käytetyt materiaalit pakkauskoneella ajettaviksi ja millä tavalla materiaaleja tulisi kehittää.

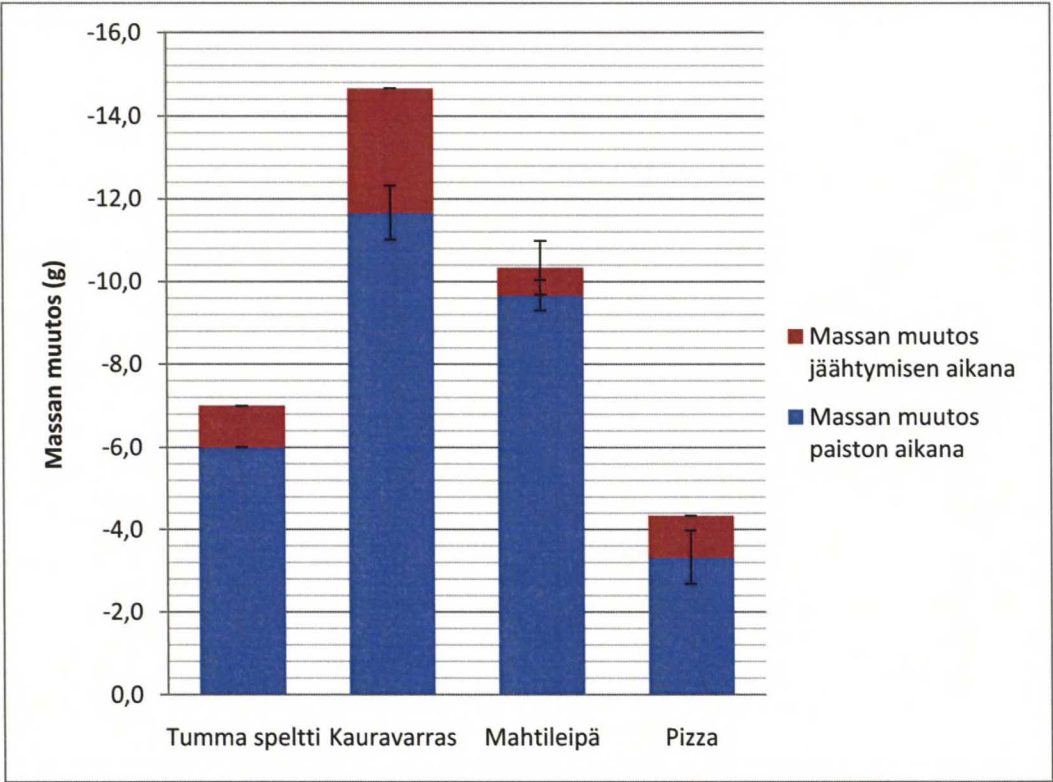
11 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

11.1 Höyrynmuodostuminen

Höyrynmuodostumisen testaamiseen käytettyjen tuotteiden alkumassat on esitetty taulukossa 8. Tuotteiden massojen muutokset paistamisen aikana ja 15 minuuttia paistamisen jälkeen on esitetty kuvassa 10.

Taulukko 8. Testaamiseen käytettyjen tuotteiden keskimääräiset alkumassat.

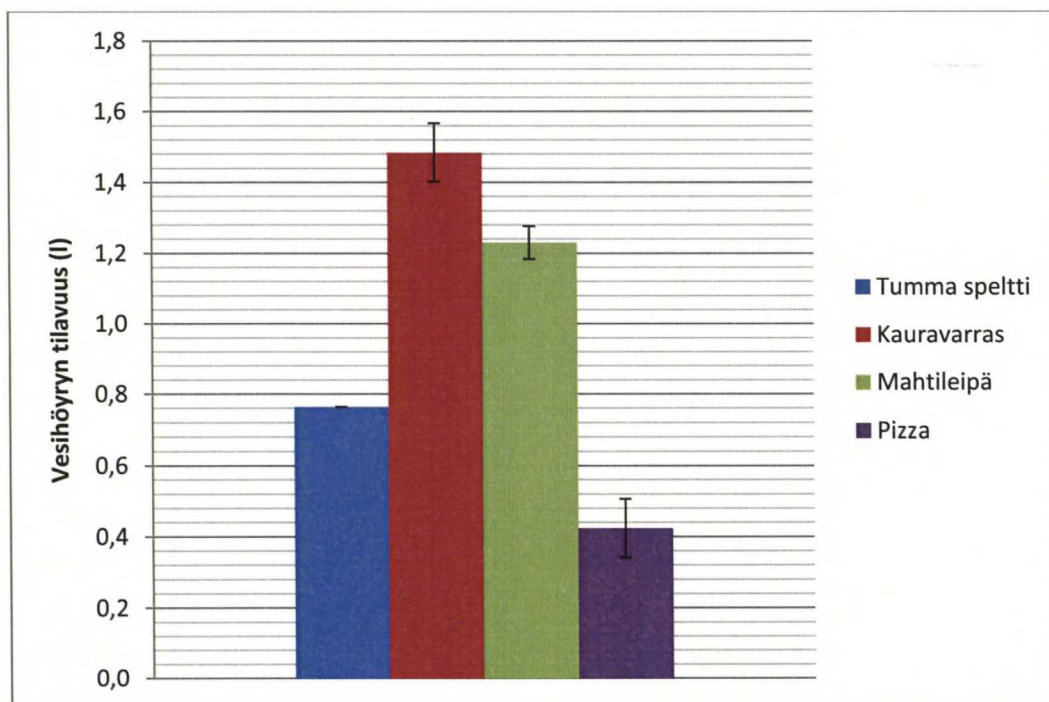
Tuote	Keskimääräinen alkumassa (g)	95 % luottamusväli (g)
Tumma speltti	401	7,9
Kauravarras	395	5,6
Mahtileipä	687	11,8
Pizza	84	5,6



Kuva 10. Tuotteiden massojen muutokset paiston ja jäähdytymisen aikana. Virhepalkit kuvaavat 95 % luottamusväliä.

Testissä oletetaan, että massan muutos johtuu pelkästään haihtuvasta vesihöyrystä. Vesihöyryn lisäksi tuotteesta poistuu esimerkiksi hiilidioksidia ja korkean lämpötilan reaktioissa tuotteessa syntyviä haihtuvia yhdisteitä. Näiden osuus massan muutoksesta oletetaan olevan pieni.

Kuvasta voidaan havaita, että suurin osa vesihöyrystä syntyy paistamisen aikana, jolloin pakkausmateriaalin tulee pystyä poistamaan sisälleen kertyvä vesihöyry ilman, että pakkaus repeää. Lisäksi höyryn poistaminen on tärkeää, jotta tuotteen pinnasta saadaan halutunlainen. Kosteissa olosuhteissa paistetun tuotteen pinta jää pehmeäksi. Tuotteista poistuvan höyryn tilavuus paistamisen aikana on esitetty kuvassa 11. Tilavuudet on laskettu tuotteesta paistamisen aikana muodostuneen vesihöyryn massoista olettaen, että vesihöyryn lämpötila oli keskimäärin noin 200 °C ja että se on kylläistä. Kylläisen vesihöyryn tiheys lämpötilassa 200 °C on 7,86 g/m³ ja paine 1560 kPa. /46, s. 20/. Tarkastelutavassa on todennäköisesti virhettä, mutta se antaa karkean arvion muodostuvan vesihöyryn tilavuudesta.



Kuva 11. Tuotteista paistamisen aikana muodostuneen vesihöyryn tilavuudet. Virhepalkit kuvaavat 95 % luottamusväliä.

Kuvasta voidaan havaita, että calzone-pizzasta muodostuu paistamisen aikana noin 0,4-0,5 l vesihöyryä. Leipätuotteista vesihöyryä muodostuu enemmän, mutta vesihöyryn määrä ei ole riippuvainen tuotteen massasta. Kauravartaan, jonka keskimääräinen massa ennen paistamista oli 395 g, paistamisessa muodostui

noin 1,5 l vesihöyryä. Mahtileipä, jonka massa oli keskimäärin 687 g, tuotti noin 1,2 l vesihöyryä. Tämä voi johtua joko tuotteiden erilaisista kosteuksista ennen paistamista, tai tuotteisiin syntyvistä erilaisista kuorista, jotka läpäisevät vesihöyryä eri tavalla.

11.2 Myymäläleipomoiden ja paistopisteiden uunien lämpötilat

Uunien lämpötilamittausten tulokset on esitetty taulukossa 9. Tuloksista voidaan havaita, että uunien todelliset lämpötilat asetusarvolla 220 °C ovat huomattavasti matalampia. Mittausten keskiarvo on 195 °C, mitattu minimiarvo on 186 °C ja maksimiarvo 204 °C.

Taulukko 9. Myymäläleipomoiden uunien lämpötilat asetusarvolla 220 °C.

Paikka	Uuni	Mittauspaikka	Lämpötila, °C
Myymälä 1	1	Ylhäällä	204
Myymälä 1	2	Ylhäällä	201
Myymälä 2	1	Keskellä	186
Myymälä 2	2	Keskellä	189
Myymälä 2	3	Keskellä	196
Myymälä 3	1	Keskellä	190
Myymälä 3	2	Keskellä	195
Myymälä 3	3	Keskellä	200

Uunien todellista pienemmän lämpötilan vuoksi tuotteita paistaessa uunin lämpötilan asetusarvo joudutaan käytännössä asettamaan tavoitearvoa korkeammaksi, jotta saavutetaan haluttu paistolämpötila. Tämä asetusarvon korotus on riippuvainen uunista ja perustuu jokapäiväisessä työssä saatuun kokemukseen uunin käyttäytymisestä. Tavallisesti uunin lämpötilalla ei ole erityisen suurta merkitystä, koska tuotteiden paistaminen tehdään silmämääräisesti. Tämä johtunee juuri siitä, että uunien todellisten lämpötilojen vaihdellessa uuniyksilöiden välillä ei voida antaa yksiselitteistä paistoaikaa. Suunnitellussa konseptissa lämpötilalla on kuitenkin suuri merkitys pakkausmateriaaliin, jolloin uunin lämpötilan tulisi olla asetettavissa luotettavasti. Lisäksi pakatun tuotteen silmämääräinen paistaminen ei ole mahdollista, koska tuote on pakkauksen sisällä eikä helposti nähtävillä paistajalle. Pakkauksessa oleva ikkuna helpottaisi paistamisen valvontaa.

11.3 Materiaalien esitutkimus

11.3.1 Sellofaani

Kirkas sellofaanikalvo tuntui ennen paistoa sopivan paksuiselta ja lujalta. Alkurepeämässä sellofaani repesi vaivatta. Paistettaessa sellofaani muuttui hieman kellertäväksi. Paistettu sellofaani oli käsiteltäessä erittäin haurasta ja helposti repeävää.

11.3.2 PET-muovi

PET-muovi on kirkasta ja varsin ohutta. Ohuuden vuoksi materiaalista ei välity korkean laadun vaikutelmaa. Käsiteltäessä PET-muovi tuntuu jäykältä, minkä vuoksi joustamaton kalvo on altis rypistymään. Materiaalin vetolujuus tuntui riittävän suurelta, mutta se repesi melko helposti. Kalvo pysyi paistamisen aikana kirkkaana ja sen lujuus tuntui käsissä yhtä suurelta kuin ennen paistamista. Paistamisen aikana kalvo oli kutistunut, minkä vuoksi se oli rypistynyt epäsäännöllisesti.

11.3.3 Tiivispaperi

Tiivispaperi oli ennen paistoa hieman kellertävää ja läpikuultavaa. Läpikuultavuus oli kuitukimppujen vuoksi epätasaista, mikä antaa paperille läikikkään ulkonäön. Tiivispaperi tuntui käsissä rapealta ja joustamattomalta. Paperi repesi melko helposti. Paistettaessa tiivispaperi muuttui hieman ruskeaksi. Uunin jälkeen käsiteltäessä se tuntui hauraalta ja rapeammalta kuin ennen uunia. Erityisesti rypistettäessä teräviin taitoskohtiin syntyi helposti reikiä.

11.3.4 MG-paperi

MG-paperi on vaaleaa ja melko ohutta. Ohuuden vuoksi se on hieman läpikuultavaa. Tästä johtuu myös kuitukimppujen aiheuttama paperin laikkuus. MG-paperin toinen puoli on matta ja toinen hieman kiiltävä. Paperi tuntui käsiteltäessä joustavalta ja lujalta. MG-paperi tummui paistettaessa vain hieman. Paperin lujuus tuntui käsissä samalta kuin ennen paistoa.

11.3.5 Dispersiopäällystetty paperi

Dispersiopäällystetty paperi on vaaleaa ja tuntui melko paksulta ja tukevalta. Myös se on hieman läpinäkyvää ja laikukasta, mutta vähemmän kuin tiivispaperi ja MG-paperi. Paperin päällystetty puoli tuntui sileämmältä kuin päällystämätön puoli. Käsissä paperi tuntui paksuudesta huolimatta joustavalta. Dispersiopäällystetty paperi tummui vastaavasti kuin MG-paperi, mikä osittain johtui samankaltaisesta pohjapaperin koostumuksesta. Koska dispersiopäällystetyn paperi neliömassa oli varsin korkea, paperi tuntui myös paistamisen jälkeen lujalta.

11.3.6 PET-paperi -laminaatti

PET-paperi -laminaatti on hieman läpikuultavaa ja laikukasta. Sen paperipuoli on melko kiiltävä ja PET-puoli hyvin kiiltävä ja sileä. Käsissä laminaatti tuntuu melko jäykältä ja joustamattomalta. Paistamisen jälkeen laminaatin paperipuoli oli rustunut hieman. Paistamisen aikana PET-kalvo oli osittain irronnut paperista. Irtoaminen oli alkanut arkkien nurkista ja reunoista. Lisäksi materiaalista nousi palaneen muovin haju.

11.3.7 Yhteenveto

Testin perusteella jatkotutkimuksiin valittiin tiivispaperi, MG-paperi ja dispersiopäällystetty paperi. Tiivispaperin ominaisuudet tuntuivat olevan hyväksyttävyyden rajalla. On kuitenkin otettava huomioon, että lopullisessa pakkauksessa tuotteesta muodostuva höyry sekä viilentää että kostuttaa pakkausmateriaalia, jolloin se ei pääse kuivumaan ja haurastumaan yhtä paljon kuin pelkkiä arkkeja paistettaessa.

Sellofaani todettiin soveltumattomaksi suunniteltuun konseptiin liian paljon heikkenevien lujuusominaisuuksien vuoksi. Lisäksi sellofaani ei kestä pakastamista, mikä myös estää sen käytön konseptissa.

PET-kalvo todettiin sellaisenaan soveltumattomaksi konseptiin johtuen materiaalin ohuudesta ja kutistumistaipumuksesta paiston aikana. Kalvon ulkonäkö ja

tuntuma eivät viesti laatua, jota brändin pakkaukselta vaaditaan. Lisäksi kalvon rei'itys estää painamisen, mikä on olennainen osa pakkausta. Painaminen tulisi suorittaa ennen rei'itystä, mutta materiaalin valmistajan mukaan kalvoa ei ole saatavilla painettuna. Kuitenkin PET-kalvo voisi toimia pakkauksen ikkunana toisen materiaalin yhteydessä. Tällöin pakkauksen hengitys tapahtuisi tehokkaasti kalvon rei'ityksen kautta. Tämän vuoksi PET-kalvo otetaan jatkotutkimuksiin ikkunamateriaalina käytettäväksi.

Käytetty PET-paperi -laminaatti ei sellaisenaan sovellu käytettäväksi suunnittelussa konseptissa delaminoitumisen ja hajun vuoksi. Molemmat ilmiöt johtuvat todennäköisesti käytetystä laminointiliimasta, joka ei ole kestänyt käytettyä paistolämpötilaa. Laminaatin toimivuutta on syytä testata vielä valmistamalla siitä mallipakkaus, jolloin voidaan tutkia pakkauksen hengittävyttä ja avattavuutta.

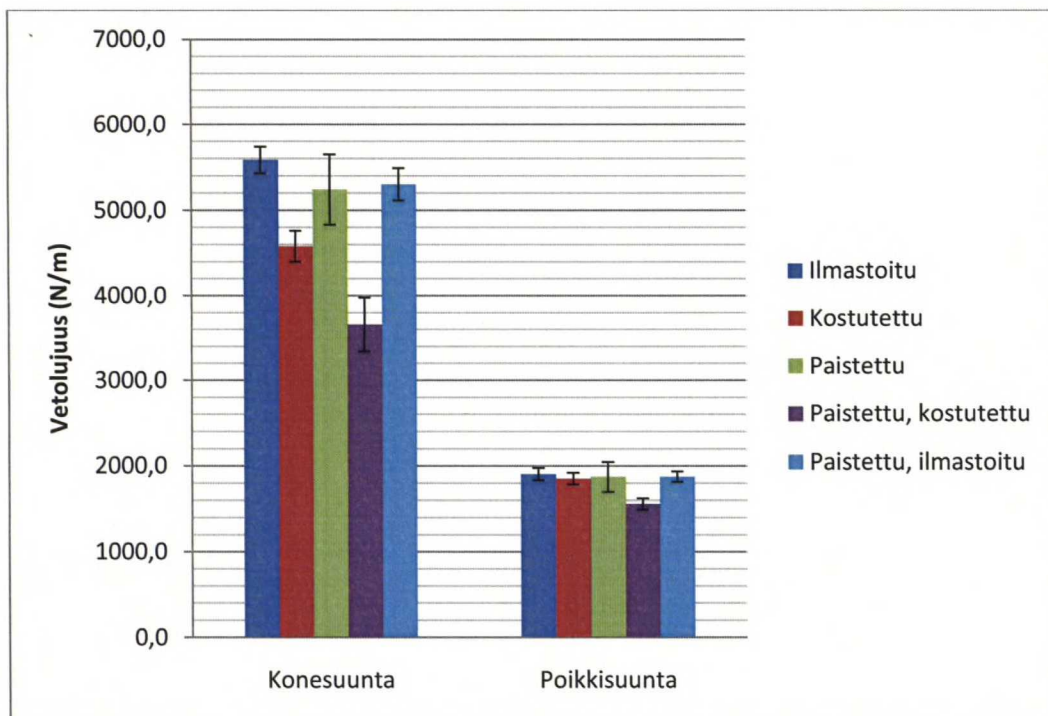
Tutkimuksessa havaittiin myös, että paistetuissa paperimateriaaleissa sormenjäljet tulee näkyviin, jos materiaaleja on käsitelty hikisillä tai rasvaisilla käsillä. Tämän vuoksi myytävien pakkausten käsittely ennen paistamista tulisi suorittaa hansikkaita käyttäen.

11.4 Vetolujuus, venymä ja murtotyö

11.4.1 Tiivispaperi

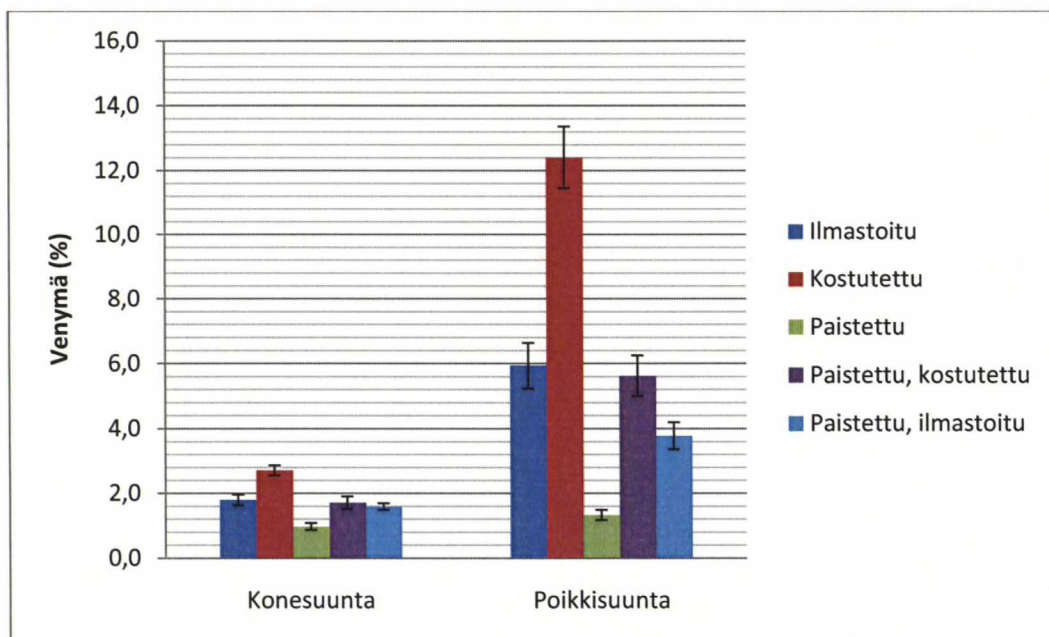
Kuvassa 12 on esitetty tiivispaperin vetolujuudet eri tavoin käsitellyille näytteille. Tuloksista voidaan havaita, että tiivispaperin vetolujuus ei juuri heikkene paistamisesta huolimatta. Tästä voidaan päätellä, että kuiduissa ei käytetyssä paistolämpötilassa vielä tapahdu sellaisia muutoksia, mikä heikentäisi kuidun koheesiota tai kuitujen välistä adheesiota. Sekä paistamattomien että paistettujen kostutettujen näytteiden vetolujuudet erityisesti konesuunnassa ovat muita heikompia. Tämä johtuu suurella todennäköisyydellä heikommasta adheesiosta kuitujen välillä. Kuitujen väliset vetysidokset ovat suuren kosteuden vuoksi heikompia, koska vesimolekyylit ovat tunkeutuneet kuitujen väleihin. Vetolujuus on kaikissa

tapauksissa suurempi konesuunnassa kuin poikkisuunnassa, mikä johtuu kuitujen orientoitumisesta konesuuntaan.



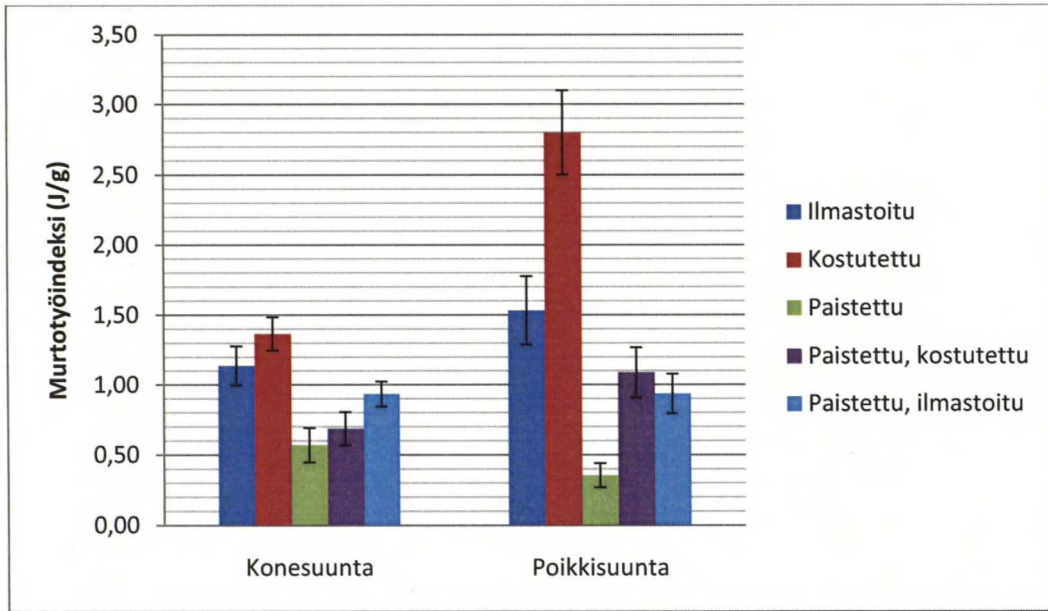
Kuva 12. Tiivispaperin vetolujuudet eri käsittelyjen jälkeen. Virhepalkit kuvaavat 95 % luottamusväliä.

Kuvassa 13 on esitetty tiivispaperin venymät eri tavoin käsitellyille näytteille. Kuvasta voidaan havaita, että kosteus vaikuttaa paperin venymään. Heti paistamisen jälkeen tiivispaperin venymä on pienimmillään. Uunissa ollessaan paperi on menettänyt kosteutta ja tulosten perusteella myös joustavuutta. Kun paperi saa kosteutta takaisin, myös sen venymä lisääntyy. Paistaminen kuitenkin vaikuttaa venymään, kuten voidaan havaita vertailtaessa paistamattomien ja paistettujen kostutettujen näytteiden venymien arvoja.



Kuva 13. Tiivispaperin venymät eri käsittelyjen jälkeen. Virhepalkit kuvaavat 95 % luottamusväliä.

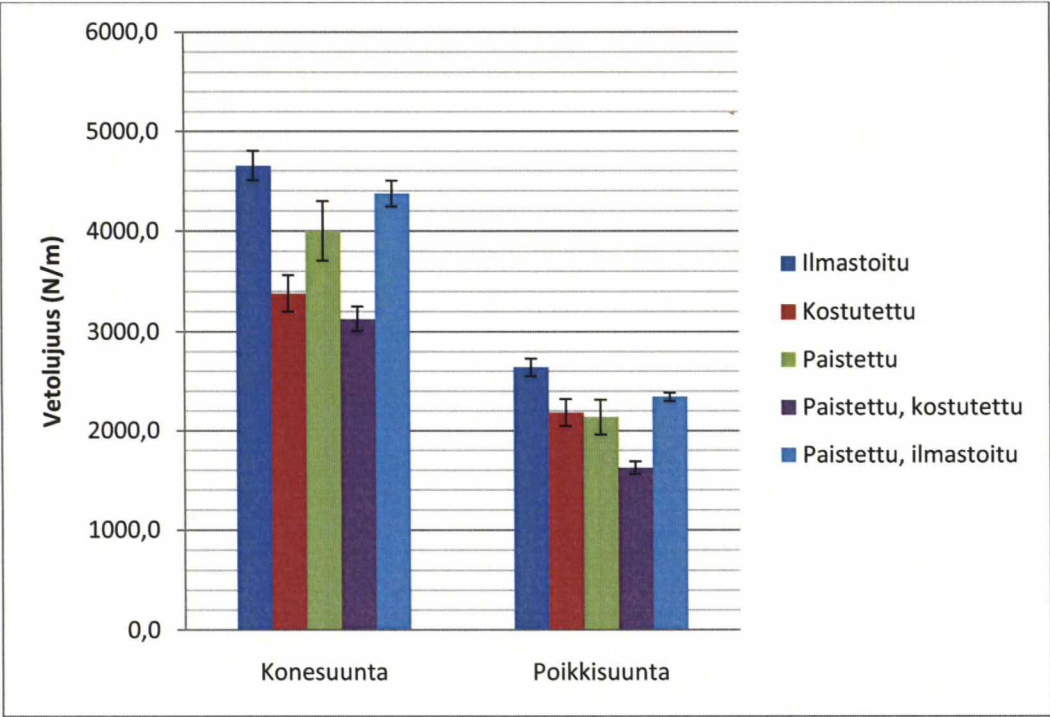
Kuvassa 14 on esitetty tiivispaperin murtotyöindeksit eri tavoin käsitellyille näytteille. Tiivispaperin neliömassana on käytetty mitattua arvoa $59,0 \text{ g/m}^2$. Kuvasta voidaan havaita, että tiivispaperi on kaikkein haurainta heti paistamisen jälkeen, mikä selittää kohdassa 11.3.3 havaittua paperin haurauden tuntua paistamisen jälkeen. Sitkeimmillään se on kostutettuna ennen paistamista. Sitkeys ei kuitenkaan palaa ennen paistamista olleelle tasolle.



Kuva 14. Tiivispaperin murtotyöindeksit eri käsittelyjen jälkeen. Virhepalkit kuvaavat 95 % luottamusväliä.

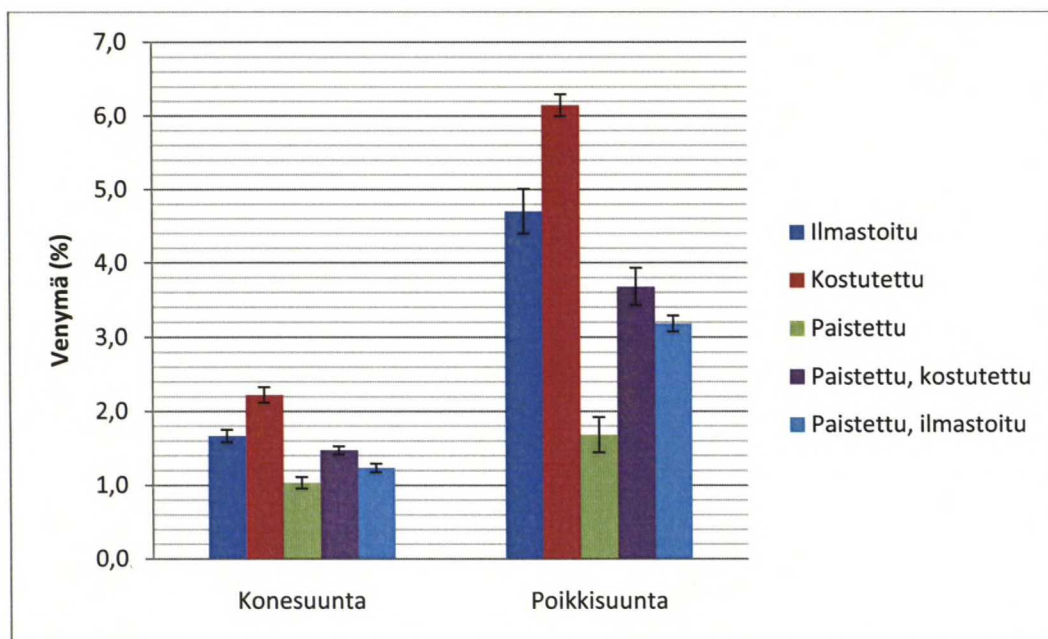
11.4.2 MG-paperi

Kuvassa 15 on esitetty MG-paperin vetolujuudet eri tavoin käsitellyille näytteille. Tuloksista voidaan havaita, että myös MG-paperin vetolujuus paistamisen jälkeen palautuu ilmastoitaessa lähelle paistamista edeltävää arvoa. Kone- ja poikkisuunnan välillä ei ole yhtä suurta eroa kuin tiivispaperilla, mistä voidaan päätellä, että tiivispaperin orientaatio on suurempi kuin MG-paperin. Orientaation vuoksi MG-paperin vetolujuus konesuunnassa on pienempi kuin tiivispaperin, mutta poikkisuunnassa vastaavasti suurempi. Kaikilla materiaaleilla sekä kone- että poikkisuunnassa ensin paistetun ja sitten kostutetun näytteen vetolujuus saa pienimmän arvon. Ilmeisesti paistamisen aikana materiaaleissa tapahtuu sellaisia muutoksia, jotka heikentävät paperin lujuutta erityisesti kosteana.



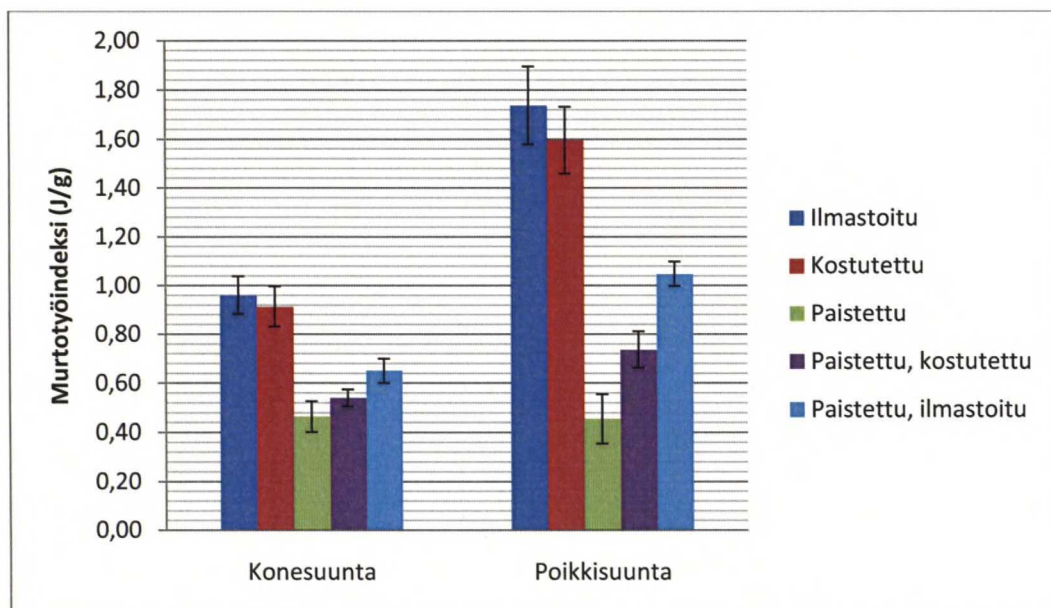
Kuva 15. MG-paperin vetolujuudet eri käsittelyjen jälkeen. Virhepalkit kuvaavat 95 % luottamusväliä.

Kuvassa 16 on esitetty MG-paperin venymät eri tavoin käsitellyille näytteille. MG-paperin venymät ovat hieman pienempiä kuin tiivispaperin. MG-paperilla venymien väliset erot poikkisuunnassa eivät ole yhtä suuret kuin muilla materiaaleilla. Konesuunnassa venymät ovat samaa tasoa muiden materiaalien kanssa.



Kuva 16. MG-paperin venymät eri käsittelyjen jälkeen. Virhepalkit kuvaavat 95 % luottamusväliä.

Kuvassa 17 on esitetty MG-paperin murtotyöindeksit eri tavoin käsitellyille näytteille. MG-paperin neliömassana on käytetty mitattua arvoa $51,1 \text{ g/m}^2$. Kuvasta voidaan havaita, että MG-paperi on heti paistamisen jälkeen lähes yhtä haurasta kuin tiivispaperi. MG-paperi on sitkeimmillään ilmastoituna, jolloin sen murtotyöindeksi on hieman korkeampi kuin tiivispaperin. MG-paperin sitkeys ei lisäänty kosteana eikä se palaa paistamista edeltäneelle tasolle ilmastoinnin jälkeen.

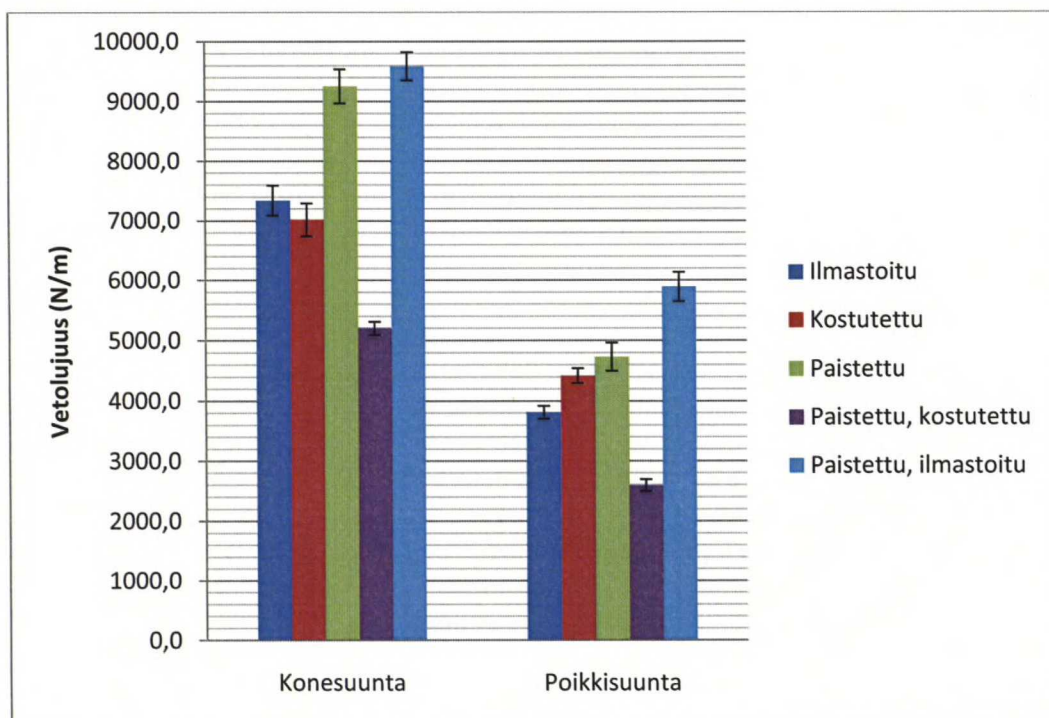


Kuva 17. MG-paperin murtotyöindeksit eri käsittelyjen jälkeen. Virhepalkit kuvaavat 95 % luottamusväliä. Asteikossa on käytetty vertailun helpottamiseksi samoja raja-arvoja kuin muillakin materiaaleilla.

11.4.3 Dispersiopäällystetty paperi

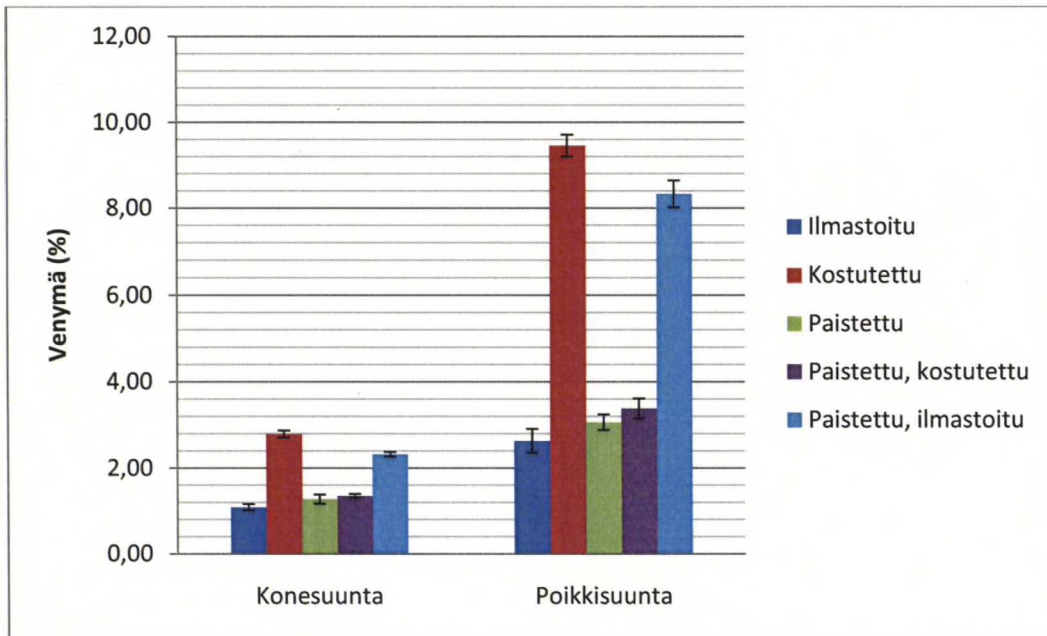
Kuvassa 18 on esitetty dispersiopäällystetyn paperin vetolujuudet eri tavoin käsitellyille näytteille. Kuvista voidaan havaita, että materiaalin vetolujuus kasvaa paistamisen aikana sekä kone- että poikkisuunnassa. Tämä johtuu suurella todennäköisyydellä päällysteen ”kypsymisestä” ja lujittumisesta paistettaessa. Voidaan olettaa, että korkeassa lämpötilassa yksittäisten polymeerimolekyylien välille ja polymeerimolekyylien ja paperin kuitujen välille syntyy uusia sidoksia. Käytetystä pohjapaperista ei ollut saatavilla näytettä, jotta olisi voitu vertailla sen vetolujuuden muuttumista verrattuna päällystetyn paperin vetolujuuteen. Dispersiopäällystetyn paperin vetolujuus erityisesti poikkisuunnassa on huomattavasti suurempi kuin tiivispaperin, vaikka ensin paistetun ja sitten kostutetun näytteen arvo onkin muita arvoja pienempi. Tämä johtuu dispersiopäällystetyn paperin neliömassasta, joka on noin kaksinkertainen tiivispaperin neliömassaan verrattuna. Kun verrataan dispersiopäällystetyn paperin ja tiivispaperin suurinta mitattua vetolujuutta, havaitaan niiden välisen suhteen olevan noin 1,7. Dispersiopäällystetyn paperin vetolujuuden voidaan olettaa olevan riittävän suuri, jotta paperi kestäisi pakkauskoneen asettamat rasitukset. Varsinaiseen tuotantokäyt-

töön on kuitenkin suunniteltu käytettävän pohjapaperia, jonka neliömassa on pienempi, noin 60 g/m².



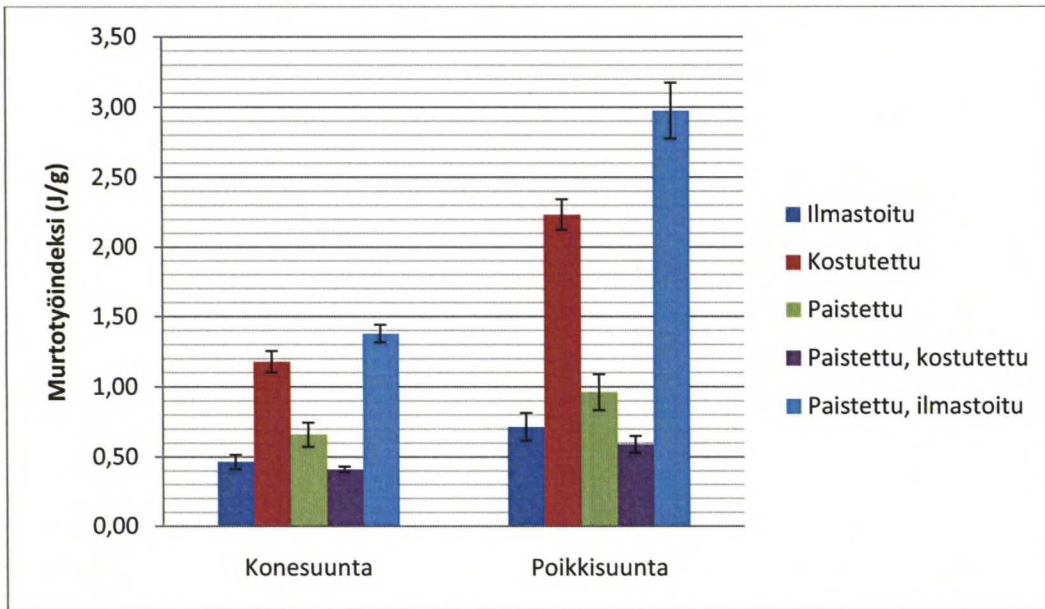
Kuva 18. Dispersiopaällystetyn paperin vetolujuudet eri käsittelyjen jälkeen. Virhepalkit kuvaavat 95 % luottamusväliä.

Kuvassa 19 on esitetty dispersiopaällystetyn paperin venymät eri tavoin käsitellyille näytteille. Dispersiopaällystetyn paperin venymät ovat samaa tasoa tiivispaperin venymien kanssa. Paistetun, kuivan näytteen venymä ei ole yhtä huomattavan pieni ja paistetun ja ilmastoidun näytteen venymä on huomattavasti suurempi. On oletettavaa, että dispersiopaällyste lisää kuitujen adheesiota sitkistään paperia, jolloin venymä ennen murtumista on suurempaa.



Kuva 19. Dispersiopäällystetyn paperin venymät eri käsittelyjen jälkeen. Virhepalkit kuvaavat 95 % luottamusväliä.

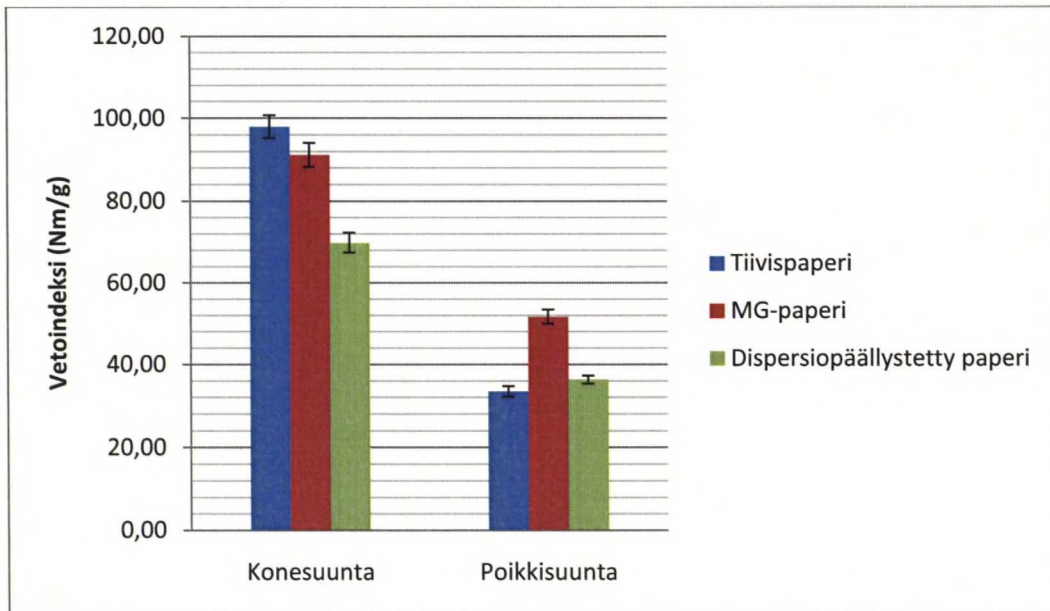
Kuvassa 20 on esitetty dispersiopäällystetyn paperin murtotyöindeksit eri tavoin käsitellyille näytteille. Dispersiopäällystetyn paperin neliömassana on käytetty valmistajan ilmoittamaa arvoa 105 g/m^2 , joka sisältää myös päällysteen. Kuvasta voidaan havaita, että dispersiopäällystetyn paperin murtotyöindeksi käyttäytyy eri tavoin kuin tiivispaperin ja MG-paperin. Dispersiopäällystetty paperi on haurainta paistamisen ja kostuttamisen jälkeen. Myös ilmastoituna ennen paistamista sen murtotyöindeksi on matalalla tasolla. Dispersiopäällystetty paperi on kostutettuna sitkeää, kuten tiivispaperi, mutta sitkeimmillään se on paistamisen jälkeen ilmastoituna. Tämä johtuu todennäköisesti samasta asiasta kuin vetolujuuden kasvaminen, eli päällysteen voidaan olettaa ”kypsyvän” ja siten lujittuvan paistamisen aikana.



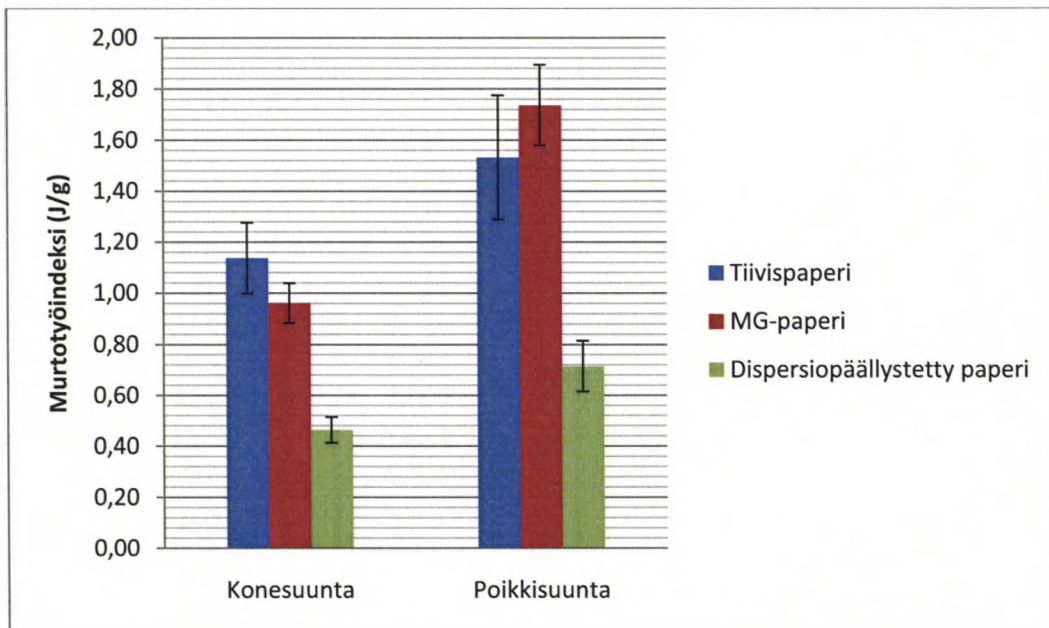
Kuva 20. Dispersiöpäällystetyn paperin murtotyöindeksit eri käsittelyjen jälkeen. Virhepalkit kuvaavat 95 % luottamusväliä.

11.4.4 Yhteenveto

Vetolujuuden suhteen merkittävin prosessivaihe on materiaalin käyttö pakkaus-koneessa. Pakkauskone aiheuttaa materiaaliin vetoa, joka asettaa materiaalin lujuuden koetukselle. Tilannetta pakkauskoneella vastaa parhaiten vetolujuusominaisuuksien mittaaminen ilmastoiduista näytteistä. Kuvissa 21 ja 22 on esitetty ilmastoitujen materiaalien vetoindeksit ja murtotyöindeksit.



Kuva 21. Ilmastoitujen materiaalien vetoindeksit. Virhepalkit kuvaavat 95 % luottamusväliä.



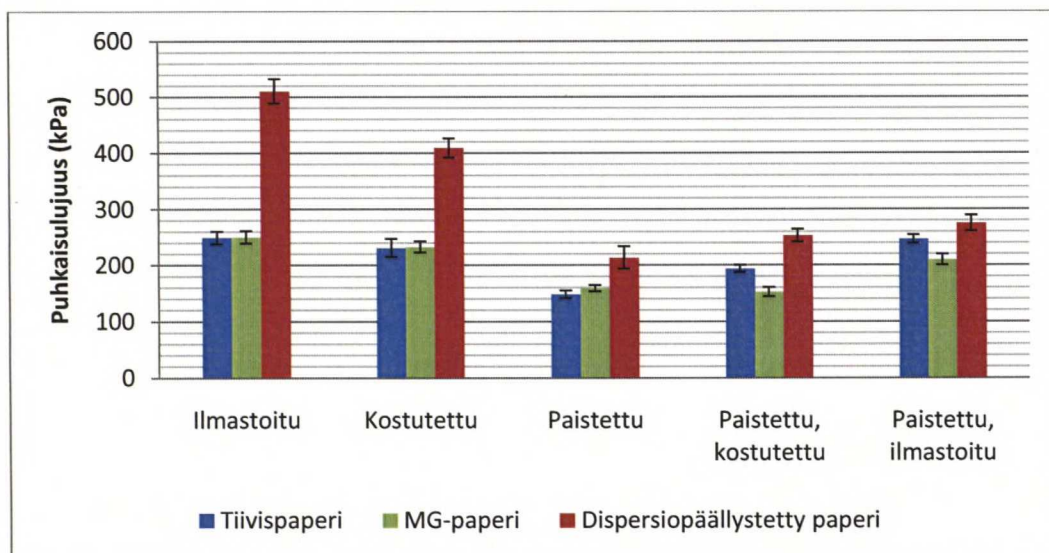
Kuva 22. Ilmastoitujen materiaalien murtotyöindeksit koottuna. Virhepalkit kuvaavat 95 % luottamusväliä.

Tiivispaperin ja MG-paperin ominaisuudet ilmastoituna ovat melko yhtenevät. Tiivispaperilla kone- ja poikkisuuntaisen vetolujuuksien ero on suurempi kuin MG-paperilla. MG-paperin kone- ja poikkisuuntaisen murtotöiden ero on taas suurempi kuin tiivispaperilla.

Dispersiopäällystetyn paperin lujuus ja sitkeys ovat suuret johtuen korkeasta neliömassasta. Tämän vuoksi sen vertailu muihin materiaaleihin on hankalaa. Indeksoituina arvoina dispersiopäällystetyn paperin vetolujuuden ja murtotyön arvot ovat muita materiaaleja matalampia, mikä johtune heikommasta pohjapaperista. Dispersiopäällysteen lujittuminen ja sitkistyminen paistamisen aikana on mielenkiintoinen ominaisuus, joka ei kuitenkaan paranna ajettavuutta pakkauskoneella. Jos dispersiopäällystetyn paperin pohjapaperina käytettäisiin tiivispaperia tai MG-paperia, voitaisiin hyvä sitkeys ennen paistamista yhdistää hyvään paistamisen jälkeiseen sitkeyteen.

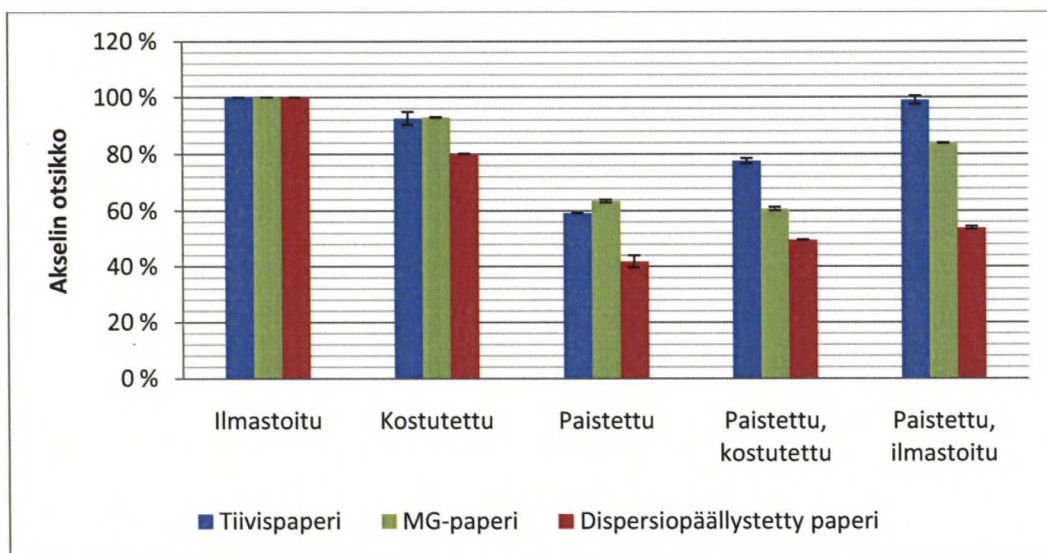
11.5 Puhkaisulujuus

Kuvassa 23 on esitetty tiivispaperin, dispersiopäällystetyn paperin ja MG-paperin puhkaisulujuudet. Kuvasta voidaan havaita, että tiivispaperin ja MG-paperin puhkaisulujuus käyttäytyy eri olosuhteissa samankaltaisesti. Paistamisen jälkeen kostutettuna tiivispaperin puhkaisulujuus oli kuitenkin 27 % korkeampi kuin MG-paperin. Paistamisen jälkeen ilmastoituna tiivispaperin puhkaisulujuus oli 17 % korkeampi kuin MG-paperin. Päällystetyn paperin puhkaisulujuus ennen paistamista oli noin kaksinkertainen verrattuna tiivispaperin ja MG-paperin puhkaisulujuuksiin. Tämän voidaan olettaa johtuvan dispersiopäällystetyn paperin korkeasta neliömassasta (pohjapaperi 90 g/m², päällyste 15 g/m²). Dispersiopäällystetyn paperin puhkaisulujuus heikkeni kuitenkin voimakkaasti paistamisen seurauksena. Paistetun ja ilmastoidun dispersiopäällystetyn paperin puhkaisulujuus oli enää 11 % korkeampi kuin tiivispaperin. Syytä dispersiopäällystetyn paperin puhkaisulujuuden voimakkaaseen heikkenemiseen ei tiedetä.



Kuva 23. Tiivispaperin, MG-paperin ja dispersiopäällystetyn paperin puhkaisulujuudet. Virhepalkit kuvaavat 95 % luottamusväliä.

Kuvassa 24 on esitetty tiivispaperin, dispersiopäällystetyn paperin ja MG-paperin suhteelliset puhkaisulujuudet. Puhkaisulujuuksia eri olosuhteissa on verrattu ilmastoidun paperin puhkaisulujuuteen. Kuvasta voidaan havaita dispersiopäällystetyn paperin puhkaisulujuuden voimakas heikentyminen paistamisen aikana. Paistetun ja ilmastoidun paperin puhkaisulujuus on 54 % ilmastoidun paperin puhkaisulujuudesta. Lisäksi voidaan havaita tiivispaperin puhkaisulujuuden lähes täydellinen palautuminen ilmastoitaessa. Paistetun ja ilmastoidun tiivispaperin puhkaisulujuus on 95 % luottamusvälillä yhtä suuri kuin ilmastoidun tiivispaperin puhkaisulujuus. Tulosten perusteella voidaan todeta, että paistamisen aikana tiivispaperissa ei tapahdu sellaisia pysyviä muutoksia, jotka vaikuttaisivat voimakkaasti puhkaisulujuuteen.



Kuva 24. Tiivispaperin, MG-paperin ja dispersiopäällystetyn paperin puhkaisulujuuksien suhde ilmastoitujen materiaalien puhkaisulujuuksiin. Virhepalkit kuvaavat 95 % luottamusväliä.

Materiaalin puhkaisulujuudella on suuri merkitys pääasiassa niissä prosessivaiheissa, joissa tuote on pakattu materiaaliin. Riittävä puhkaisulujuus estää tuotetta tai pakatun tuotteen kanssa esimerkiksi ostoskassissa olevaa toista tuotetta puhkaisemasta pakkausmateriaalia. Tällöin merkitystä on erityisesti paistamisen jälkeisellä puhkaisulujuudella sekä kosteana että ilmastoituna.

Tiivispaperin puhkaisulujuuden palautuminen on eduksi suunniteltua käyttötarkoitusta ajatellen. Jos lujuuden taso on riittävä, tiivispaperi soveltuu hyvin tarkoitukseen. Myös MG-paperin puhkaisulujuus palautuu paistamisen aiheuttamasta rasiuksesta, mutta ei yhtä paljon kuin tiivispaperin. Ei ole tiedossa, johtuuko dispersiopäällystetyn paperin puhkaisulujuuden heikkeneminen käytetystä pohjapaperista vai päällysteestä. Jos heikkenemisen syynä on pohjapaperi, tulosta voitaisiin parantaa erilaisella pohjapaperilla.

11.6 Ilmanläpäisevyys

Ilmanläpäisevyys kuvaa materiaalin huokoisuutta. Taulukossa 10 on esitetty käytettyjen materiaalien ilmanläpäisevyydet. Voidaan havaita, että MG-paperin ilmanläpäisevyys on 500-kertainen tiivispaperin ilmanläpäisevyyteen verrattuna, mikä osoittaa MG-paperin suura huokoisuutta. Tiivispaperin ja MG-paperin ne-

liömassat ovat lähellä toisiaan, jolloin tuloksista voi nähdä voimakkaan jauhatuksen vaikutuksen ilmanläpäisevyyteen. MG-paperin suuren huokoisuuden perusteella voidaan olettaa sen rasvanläpäisevyyden olevan korkea. MG-paperin huokoisuutta voidaan vähentää päällystämällä se barrierpäällysteellä.

Taulukko 10. Eri materiaalien ilmanläpäisevyydet.

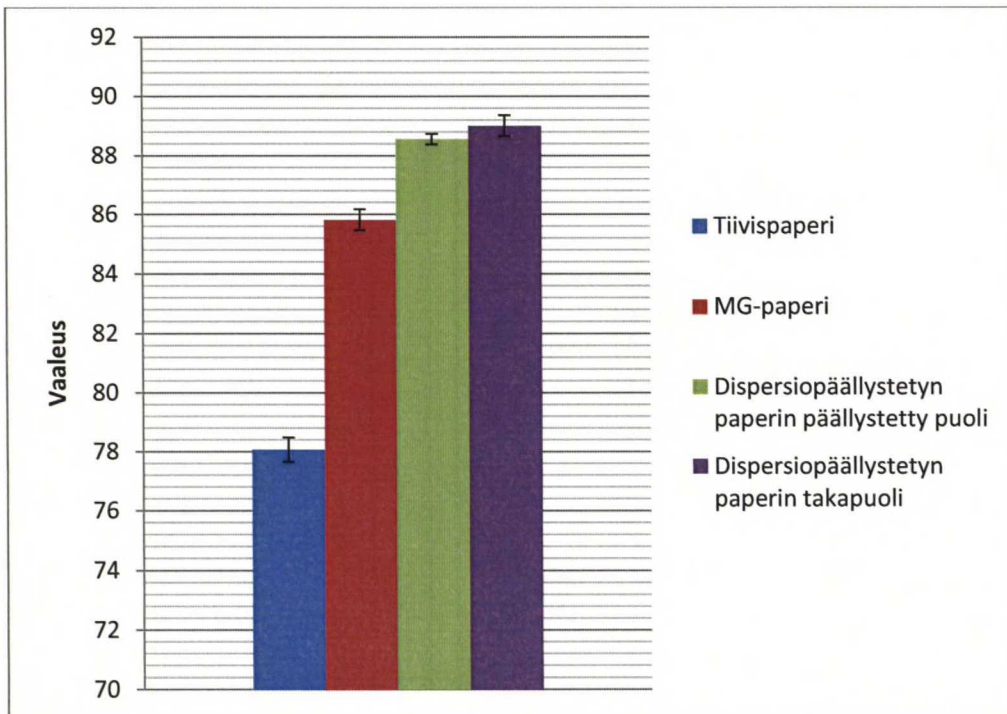
Materiaali	Ilmanläpäisevyys ($\mu\text{m}/\text{Pa}\cdot\text{s}$)	95% luottamusväli
Tiivispaperi	0,010	0,004
Dispersiopäällystetty paperi	0,157	0,012
MG-paperi	5,000	0,087

Tiivispaperin huokoisuuden voidaan olettaa olevan riittävän pieni soveltuakseen suunniteltuun käyttötarkoitukseen. MG-paperin huokoisuus on varsin suuri, minkä vuoksi se ei sovellu käytettäväksi rasvaisten tuotteiden kanssa ilman huokoisuutta vähentävää päällystettä.

Dispersiopäällystetyn paperin ilmanläpäisevyyden arvo on melko pieni, mikä johtuu sekä päällysteestä, joka on vähentänyt paperin huokoisuutta, että paperin korkeasta neliömassasta. Pienen huokoisuuden vuoksi materiaalin rasvanläpäisevyyden oletetaan olevan riittävä suunniteltuun käyttötarkoitukseen. Tarvittaessa huokoisuutta voidaan vähentää valitsemalla tiiviimpi pohjapaperi.

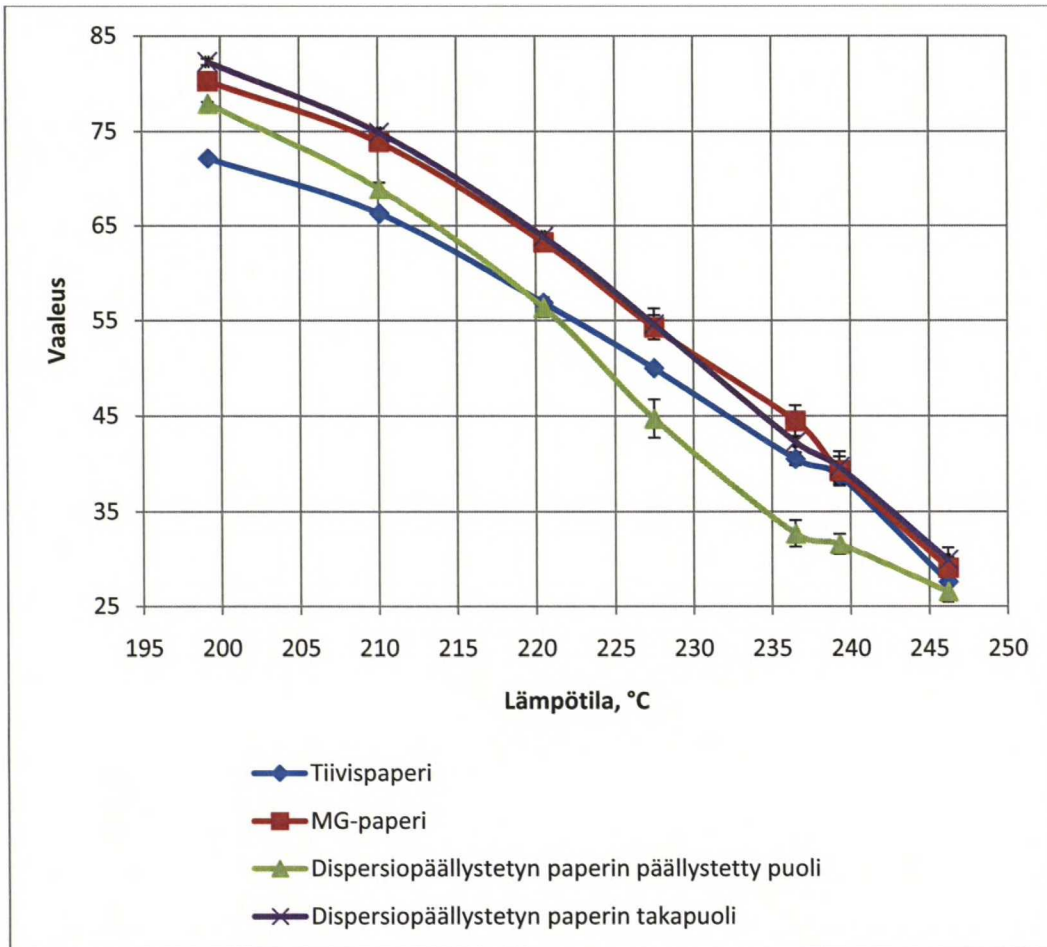
11.7 Materiaalin tummuminen paistettaessa

Kuvassa 25 on esitetty käytettyjen materiaalien mitatut vaaleudet ennen paistamista. Kuvasta voidaan havaita, että tiivispaperin vaaleus on selvästi pienin ja että dispersiopäällystetyn paperin päällystetyn puolen vaaleus on hieman alhaisempi kuin päällystämättömän puolen.



Kuva 25. Materiaalien vaaleudet ennen uunia. Virhepalkit kuvaavat 95 % luottamusväliä.

Kuvassa 26 on esitetty materiaalien vaaleuden käyttäytyminen lämpötilan funktiona alueella 200-245 °C. Kuvasta voidaan havaita, että huoneenlämmössä vaaleimmat materiaalit pysyvät kaikissa lämpötiloissa vaaleimpina myös paistamisen jälkeen. Dispersiopäällystetyn paperin eri puolien välinen vaaleusero kasvaa lämpötilan kasvaessa ollen suurimmillaan alueella 225-240 °C. Tämän voidaan olettaa johtuvan dispersiopäällysteessä syntyvistä värillisistä yhdisteistä korkean lämpötilan seurauksena, mikä laskee päällystetyn puolen vaaleutta nopeammin kuin päällystämättömän puolen. Tiivispaperin vaaleus laskee pääasiassa muita materiaaleja hitaammin, minkä vuoksi materiaalien vaaleudet lämpötilassa 240 °C ovat hyvin lähellä toisiaan dispersiopäällystetyn paperin päällystettyä puolta lukuun ottamatta.

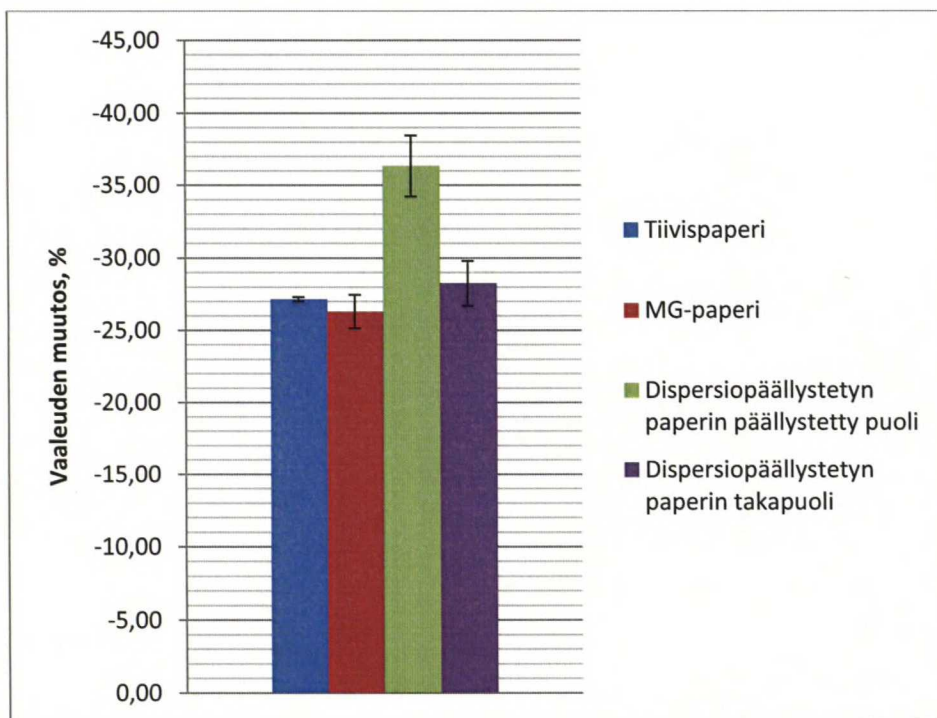


Kuva 26. Materiaalien vaaleus lämpötilan funktiona. Vaaleuden virherajat kuvaavat 95 % luottamusväliä ja lämpötilan virherajat 0,1 °C mittauksen tarkkuutta.

Dispersiopäällystetyn paperin päällystetyn puolen tummumisella ei ole suurta merkitystä, koska se jää pakkauksen sisäpuolelle eikä ole näkyvissä kuluttajalle ennen pakkauksen avaamista. Suurempi ongelma on korkean lämpötilan seurauksena muodostuvat yhdisteet, joiden mahdollisesta myrkyllisyydestä ei ole tietoa. Valmistajan ilmoituksen mukaan päällyste kestää kemiallisesti hajoamatta 260 °C lämpötilaan asti.

Lämpötilassa 220 °C, joka on tuotteiden suunniteltu paistolämpötila, MG-paperin ja dispersiopäällystetyn paperin päällystämättömän puolen vaaleudet ovat lähellä toisiaan ja noin seitsemän prosenttiyksikköä korkeammat kuin tiivispaperin ja dispersiopäällystetyn paperin päällystetyn puolen vaaleudet. Kuvassa 27 on esitetty käytettyjen materiaalien vaaleuksien muutos 220 °C lämpötilassa paistami-

sen aikana. Kuvasta voidaan havaita päällystetyn paperin päällystetyn puolen muita voimakkaampi tummuminen. Muiden materiaalien suhteellinen tummuminen on tässä lämpötilassa varsin yhtä suurta.



Kuva 27. Käytettyjen materiaalien vaaleuden muutos, kun materiaaleja on paistettu 220 °C:ssa verrattuna vaaleuteen ennen paistamista. Virhepalkit kuvaavat 95 % luottamusväliä.

11.8 Testaus pilot-mittakaavassa

11.8.1 Tiivispaperi ja päällyste 1

Paistettaessa päällyste 1:llä käsiteltyä tiivispaperipakkausta havaittiin, että paperin matalasta ilmanläpäisevyydestä huolimatta pakkauksen sisälle muodostuva vesihöyry poistui pakkauksesta, jolloin paine ei päässyt nousemaan niin suureksi, että se olisi rikkonut pakkauksen. Tuote todettiin oikein kypsytneeksi. Tiivispaperi tuntui paistamisen jälkeen vahvemmalta kuin kohdan 11.1 havainnoissa. Tämän oletetaan johtuvan tuotteesta muodostuneesta vesihöyrystä, joka kostutti paperia sekä esti paperin lämpötilan nousemisen yhtä korkeaksi kuin ympäröivän uunin lämpötila. Matalampi lämpötila näkyi myös materiaalin vähäisempänä tummumisena erityisesti tuotteen kohdalta. Pakkauksen reuna-alueilla materiaali oli

tummunut enemmän. Testin perusteella materiaalin voidaan ajatella soveltuvan uuninkestäväksi pakkausmateriaaliksi.

Ennen paistamista väritön kuumasauauspäällyste muuttui paistettaessa tumman ruskeaksi ja lakkamaisen kiiltäväksi. Paistamisen aikana pakkauksen saumat pysyivät kiinni ja kuumasauauspäällyste oli saumautunut vastakkaiseen päällystepintaan lähes koko annostellun alueen leveydeltä. Paistamisen jälkeen pakkauksessa tuntui palaneen muovin haju, joka on peräisin kuumasauauspäällysteen termisestä hajoamisesta paistamisen aikana. Hajun vuoksi päällyste 1 ei sovellu käytettäväksi uuninkestävässä pakkauksessa. Tämä oli odotettavaa, koska kyseistä päällystettä ei ole tarkoitettu korkeisiin lämpötiloihin.

11.8.2 MG-paperi sekä päällyste 2 ja päällyste 3

MG-paperi pysyi paistamisen aikana varsin vaaleana. Vain pakkauksen reunoilla oli havaittavissa lievää kellastumista. Paperi tuntui paistamisen jälkeen yhtä lujalta kuin ennen paistamista. Tuote tarttui paistamisen aikana kiinni materiaaliin kohdista, joista tuote oli kostea. Tämän vuoksi kosteita tuotteita paistettaessa paperin irrokeominaisuuksia tulee lisätä. Jos päällysteen levittäminen kauttaaltaan ei ole riittävä toimenpide, irrokeominaisuuksien lisääminen voidaan toteuttaa myös tuotteen kanssa kosketuksiin joutuvien materiaalapintojen silikonoinnilla.

Päällyste 3 oli tummunut paistamisen aikana huomattavasti enemmän kuin pakkausmateriaali. Alueet, joille päällystettä oli levitetty, näkyivät selvästi pakkauksessa. Päällysteestä ei havaittu muodostuvan ylimääräisiä hajuja paistamisen aikana. Pakkauksen saumat eivät pysyneet kiinni paistamisen aikana, mikä johtuu joko päällysteen soveltumattomuudesta korkeisiin lämpötiloihin tai käytettyä saumauslaitteesta. Saumauslämpötila ei mahdollisesti ole ollut riittävä kyseiselle kuumasauauspäällysteelle. Paperin lujuus paistamisen jälkeen oli huomattavasti heikompaa alueilla, joille oli levitetty kuumasauauspäällystettä. Näillä alueilla paperi oli haurasta ja repesi helposti. Tämä voi johtua levitetyn

kuumasaumauspäälysteen runsaasta annostelusta. Käytetty annostelumenetelmä ei mahdollista pienen määrän annostelua.

Päälyste 3 voi soveltua suunniteltuun käyttötarkoitukseen, jos saumat saadaan pysymään kiinni korkeamman saumauslämpötilan avulla. Todennäköisin syy pakkauksen avautumiseen oli kuitenkin päälysteen liian voimakas pehmentyminen korkean lämpötilan vaikutuksesta. Päälysteen tummuminen ei haittaa, jollei samanaikaisesti synny myrkyllisiä yhdisteitä. Levittämällä päälystettä koko paperin alueelle pakkaus tummuu tasaisemmin, jolloin saumausalueille ei muodostu tummia rajoja. Tämä lisää myös suunnitellussa käyttötarkoituksessa tärkeää rasvabarrieria tukkimalla materiaalin huokosia. Se voi myös lisätä materiaalin irrokeominaisuuksia, jolloin tuote ei tartu materiaaliin niin herkästi. Saumojen kiinnipysyminen tulisi kokeilla saumauslaitteistolla, jossa saumauslämpötila on suurempi. Paperin haurastuminen voi muodostua ongelmaksi varsinkin, jos päälystettä on levitetty koko materiaalille.

Päälyste 2 oli tummunut paistamisen aikana silmämääräisesti yhtä paljon kuin päälyste 3. Tummuminen ei näkynyt paperin toiselle puolelle yhtä selvästi. Paperin havaittiin muuttuneen läpikuultavaksi niillä alueilla, joille kuumasaumauspäälystettä oli levitetty. Läpikuultavuus vaihteli päälysteen annostelun epätasaisuuden vuoksi. Päälysteestä ei havaittu muodostuneen ylimääräisiä hajuja. Pakkauksen saumat olivat pysyneet kiinni paistamisen aikana. Päälyste ei ollut tarttunut kiinni vastakkaiseen pintaan muualta, kuin saumauslaitteella saumatuista kohdista. Pakkausta avattaessa saumat osittain peelautuivat, jolloin jäi näkyviin katkenneita kuituja. Joissain kohdin paperi repesi kokonaan varsinaisen sauman pysyessä kiinni. Paperin lujuus alueilla, joille päälystettä oli levitetty, vaikutti normaalilta.

Päälyste 2 vaikuttaa soveltuvan uuninkestävään pakkaukseen paremmin kuin Päälyste 3. Molemmat päälysteet tummuvat paistamisen aikana, mutta päälyste-

te 2 ei haurastuta paperia kuten päällyste 3. Tämän vuoksi koeajoissa käytettäväksi kuumasaumauspäällysteeksi valitaan päällyste 2.

11.8.3 Dispersiopäällystetty paperi

Dispersiopäällystetystä paperista valmistetun pakkauksen saumat pysyivät kiinni paistamisen aikana. Pakkauksesta ei havaittu ylimääräisiä hajuja. Paistamisen aikana tuotteesta muodostunut vesihöyry poistui pakkauksesta materiaalin läpi rikkomatta saumaa ja pullistamatta pakkausta. Tuotteen pintarakenne oli paistamisen jälkeen rapea. Tästä voidaan päätellä, että vesihöyryn paine pysyy riittävän alhaisena pakkauksen sisällä paistamisen aikana.

11.8.4 PET-paperi -laminaatti

Tuotetta PET-paperi -laminaatista valmistetussa pakkauksessa paistettaessa havaittiin samanlaista palaneen hajua ja paperin irtoamista muovikalvosta kuin osassa 11.3. Pakkauksen avaaminen oli hankalaa PET-kalvon sitkeyden vuoksi.

Paistamisen aikana pakkaus pullistui tuotteesta muodostuvan vesihöyryn vuoksi. Pakkauksen saumaan repesi pieni reikä höyrynpaineen noustua riittävän korkeaksi. Pakkaus pysyi pulleana reiästä huolimatta, mutta suurta, hallitsematonta repeämää ei syntynyt. Pülleudesta voidaan päätellä, että syntynyt reikä poisti vain tarpeellisen määrän höyryä ja että pakkauksen höyrynpaine oli edelleen varsin korkea.

PET-paperi -laminaatti ei sovellu sellaisenaan suunniteltuun konseptiin hajun, delaminoitumisen, avattavuusongelmien ja puutteellisen höyrynpoiston vuoksi. Kuten osassa 11.3 on mainittu, delaminoituminen ja haju voidaan estää käyttämällä toista laminointiliimaa. Laminaatista valmistetun pakkauksen avaamisen helpottamiseksi pakkauksessa tulisi olla jonkinlainen alkurepeämä, jolloin PET-kalvo repeäisi helpommin. Tällaisen alkurepeämän valmistaminen voi vaatia lisälaitteen pakkauskoneeseen. Korkea höyrynpaine pakkauksen sisällä jättää tuotteen pinnan pehmeäksi, mikä voi soveltua joillekin tuotteille. Rapeakuorisia tuot-

teita paistettaessa syntyvä vesihöyryn tulee poistua pakkauksesta tehokkaammin, mikä voidaan saavuttaa esimerkiksi laminaatin rei'ittämisellä.

11.9 Testaus tuotantomittakaavassa

11.9.1 Käsittely painokoneessa

Materiaaleja painettaessa havaittiin päällyste 2:n matalan kuiva-ainepitoisuuden (30 %) aiheuttavan ongelmia painokoneen ajettavuudessa. Mahdollisimman suuren päällystemäärän saavuttamiseksi käytettiin antavinta mahdollista rasterite-
laa. Korkean aineensiirtokyvyn ansiosta paperille siirtyi varsin runsaasti päällystettä, mutta päällysteen korkean vesipitoisuuden vuoksi rata kastui samalla voimakkaasti. Koska painokone ei ollut varustettu riittävällä radankuivauslaitteistolla, sen ajonopeus piti pitää matalana radan kuivumisen varmistamiseksi ennen kiinnirullausta. Käytetty ajonopeus oli välillä 8-25 m/min ollen matalin ajettaessa tiivispaperia 34 g/cm³ rasteritelalla ja korkein ajettaessa MG-paperia 18 g/cm³ rasteritelalla. Normaali ajonopeus painokoneella on välillä 40-70 m/min. Painokonekäsittelyn taloudellisen kannattavuuden rajana voidaan pitää 20 m/min ajonopeutta. Kuumasaumauspäällysteen valmistajan mukaan kyseisen päällysteen kuiva-ainepitoisuutta ei voida lisätä, koska se johtaisi ongelmiin dispersion stabiilisuudessa.

Käsitellyistä materiaaleista mitatut päällystemäärät on esitetty taulukossa 11. Taulukosta voidaan havaita, että 18 g/cm³ rasteritelalla käsiteltyjen materiaalien päällystemäärä on negatiivinen. Tämä voi johtua siitä, että reuna-alueille levitetyn päällysteen määrän mittaamiseen ei voida käyttää normaalia arkkistanssia (141 mm·141 mm) vaan punnittavat näytteet tuli leikata käsin. Käsin leikattujen arkkien kokoa ei käsin leikatessa pystytty välttämättä määrittämään yhtä tarkasti kuin stanssattujen arkkien, jolloin mittaustarkkuus jää heikommaksi. Toinen vaihtoehto on, että saavutettu päällystemäärä 18 g/cm³ rasteritelalla on niin vähäinen, että se hukkuu paperin neliömassan normaaliin vaihteluun. Joka tapauksessa päällystemäärä on ollut hyvin pieni.

Taulukko 11. Painokoneella käsiteltyjen materiaalien päällystemäärät.

Laji	Päällysteen kohdistus	Rasteritelan antavuus (g/cm ³)	Päällystettä (g/m ²)
MG-paperi	Reunoille	18	-0,071
MG-paperi	Kauttaaltaan	34	0,984
Tiivispaperi	Reunoille	18	-0,084
Tiivispaperi	Reunoille	34	0,104

34 g/cm³ rasteritelalla päällystemääräksi saatiin MG-paperille 0,984 g/m² ja tiivispaperille 0,104 g/m², mikä on liian vähän riittävien barrierominaisuuksien saavuttamiseksi. Päällystettä käytetään tavallisesti 4-15 g/m² ja barrierominaisuuksia varten tarpeellinen määrä on vähintään 3-5 g/m². Lisäksi on havaittava, että 34 g/cm³ rasteritelalla käsitellyn MG-paperin mitattu päällystemäärä sisältää myös pienen määrän painoväriä, koska näyte otettiin painetusta materiaalista. Tämän vuoksi mittaustulos on muutaman prosentin suurempi kuin todellinen päällystemäärä.

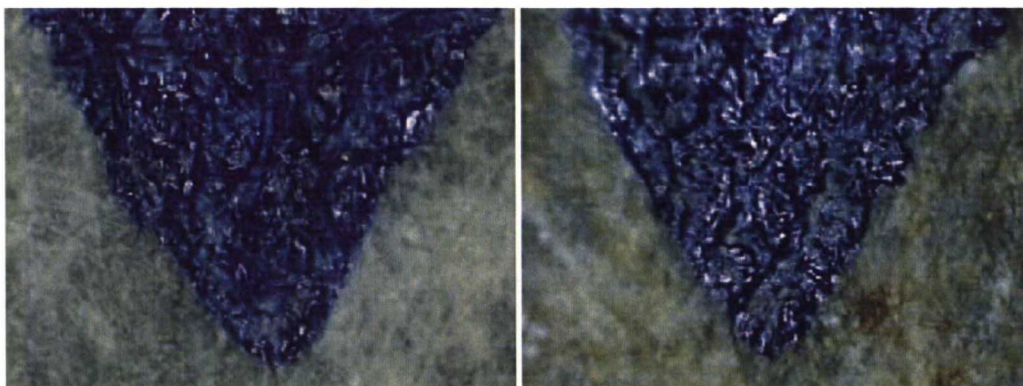
Painokoneella käsiteltyjä materiaaleja koesaumattaessa havaittiin, että materiaalit eivät saumaudu. Todennäköisesti tämä johtui liian pienestä päällystemäärästä. On myös mahdollista, että käytetyn käsisaumaimen saumauslämpötila ei ollut riittävä saumaukseen, mikä pitää vielä varmistaa pakkauskonekoeajossa.

Painettujen materiaalien tarkastelussa paistamisen jälkeen havaittiin, että saumausaine tummuu vain hieman paperia enemmän paistamisen aikana. Tämä johtunee päällysteen vähäisestä määrästä. Suuremmalla päällystemäärällä tummuminen olisi todennäköisesti ollut voimakkaampaa. Tämän vuoksi on mahdollista, että päällystettä pitää ulkonäkösyistä levittää materiaalille kauttaaltaan, vaikka materiaalin barrierominaisuuksia ei tarvitsekaan parantaa.

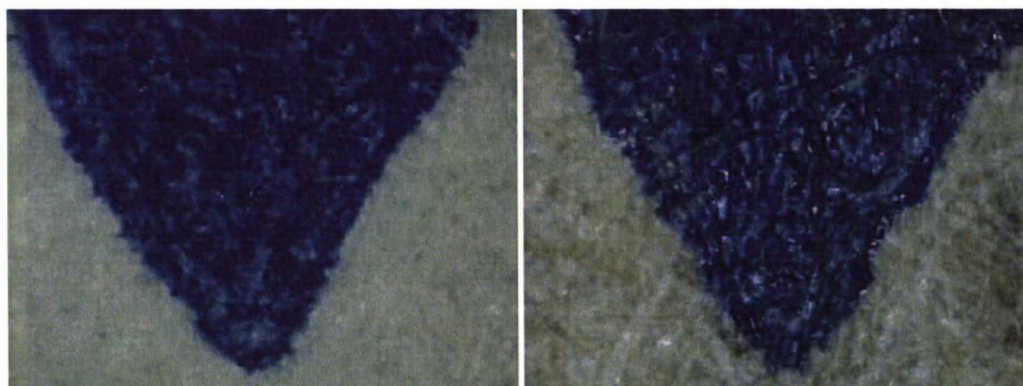
11.9.2 Painatuksen laatu

Kuvissa 28 ja 29 on esitetty materiaaleista otetut 200-kertaiset suurennokset. Suurennoksista voidaan havaita, että erityisesti tiivispaperilla painoväriin kiilto on lisääntynyt. Kiillon lisääntymisen voidaan olettaa johtuvan painoväriin komponenttien, erityisesti sideaineen, pehmentymisestä paistamisen aikana. Komponentit ovat päässeet liikkumaan ja järjestymään uudelleen, mikä on luonut

kiiltävämmän pinnan. MG-paperin kohdalla kiillon lisääntyminen ei ole yhtä selvästi havaittavissa. Tämä saattaa johtua siitä, että painoväri on kulkeutunut syvemmälle MG-paperin rakenteeseen, koska sen rakenne on avoimempi kuin tiivispaperin. Tiivispaperin kohdalla painoväri on jäänyt paperin pinnalle. Suurenoksista ei voida havaita halkeamia tai muita korkean lämpötilan aiheuttamia vaurioita painoväriässä.



Kuva 28. 200-kertaiset suurennokset painetusta tiivispaperista ennen paistamista (vasemmalla) ja paistamisen jälkeen (oikealla).



Kuva 29. 200-kertaiset suurennokset painetusta MG-paperista ennen paistamista (vasemmalla) ja paistamisen jälkeen (oikealla).

11.9.3 Painovärin muuttuminen paistettaessa

Taulukossa 12 on esitetty painovärin (PMS 288) Lab-koordinaattien muutokset eri materiaaleilla. Taulukon tiedoista havaitaan, että L-koordinaatin pienennyttyä väri on hieman tummunut. a-koordinaatin pienentyminen ilmaisee värin muuttuneen hieman vihreämmäksi. b-koordinaatin kasvaminen ilmaisee värin muuttuneen keltaisemmaksi.

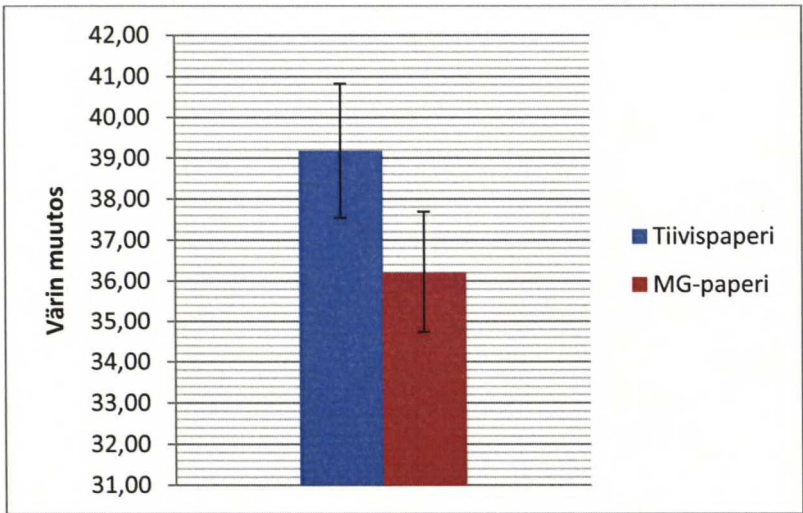
Taulukko 12. Painovärin Lab-koordinaattien muutos eri materiaaleilla.

Laji	ΔL	Δa	Δb
Tiivispaperi	-7,5	-9,2	37,3
MG-paperi	-6,5	-10,2	34,1

Muutoksen suuruus voidaan laskea yhtälöstä

$$\Delta C = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \tag{16}$$

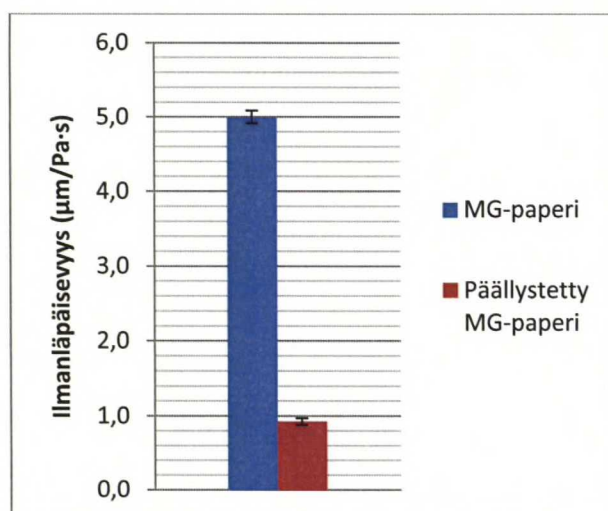
Yhtälön perusteella lasketut painovärin kokonaismuutokset on esitetty kuvassa 30. Tuloksista voidaan havaita, että painoväri muuttuu enemmän tiivispaperilla kuin MG-paperilla. Muutosten ero materiaalien välillä on noin 8 %.



Kuva 30. Painovärin kokonaismuutos eri materiaaleilla laskettuna Lab-koordinaattien muutoksista. Virherajat kuvaavat 95 % luottamusväliä.

11.9.4 Päälysteen vaikutus materiaalin ilmanläpäisevyyteen

Kuvassa 31 on esitetty MG-paperin ilmanläpäisevyys ilman päälystettä ja 34 g/cm³ rasteritelalla levitetyllä päälysteellä. Kuvasta voidaan havaita, että MG-paperin ilmanläpäisevyys on vähentynyt päälystykseen seurauksena noin 80 %, vaikka saavutettu päälystemäärä on vain noin 1 g/m². Saavutettu barrier ei todennäköisesti ole vielä riittävä estämään rasvan kulkeutumista. Päälystemäärän tulisi olla alueella 4-15 g/m². MG-paperi päälystettiin paperin mattapuolelta. Saavutettu ilmanläpäisevyyden arvo olisi luultavasti ollut pienempi, jos päälyste olisi levitetty paperin sileämmälle puolelle, koska silloin päälysteellä olisi ollut vähemmän huokosia tukittavana.



Kuva 31. Päälystetyn ja päälystämättömän MG-paperin ilmanläpäisevyydet. Virhepalkit kuvaavat 95 % luottamusväliä.

Myös päälystetyn tiivispaperin ilmanläpäisevyyttä yritettiin määrittää, mutta ilmanläpäisevyys oli niin pieni, että käytetty ilmanläpäisevyydenmittauslaitteisto ei pystynyt antamaan siitä tulosta. Tiivispaperin ilmanläpäisevyys on jo lähtökoh-
taisesti varsin pieni, joten päälystäminen on tehnyt paperista käytännössä ilmaa
läpäisemätöntä, vaikka päälystemääräksi saatiin vain 0,1 g/m². Jotta tiivispape-
ria voitaisiin käyttää vesihöyrybarrieria vaativissa pakkauksissa, päälystemäärän
tulisi olla huomattavasti suurempi.

11.9.5 Koeajo pakkauskoneessa

Taulukossa 13 on esitetty pakkauskoneella koeajetut materiaalit. Koeajossa havaittiin, että käytetty pakkauskone ei sellaisenaan sovellu paperiratojen käyttöön. Koska radan siirtorullat ovat pitkittäissaumausrullien yhteydessä, rataa kohdistuu voimakas veto sen kiertäessä useiden telojen kautta rullalta taittolaatikolle ja sen jälkeisille siirtorullille. Lisäksi materiaalirullan kannatin oli varustettu jarrulaitteistolla, joka piti rataa kireällä. Tämän vuoksi materiaaleja ei saatu kulkemaan luotettavasti pakkauskoneessa.

Taulukko 13. Pakkauskonekoeajossa käytetyt materiaalit.

Materiaali	Käytetty rasteritela (g/cm ³)	Päällysteen kohdistus
MG-paperi + BIM 8805 -päällyste	18	Reunoille
MG-paperi + BIM 8805 -päällyste	34	Kauttaaltaan
Tiivispaperi + BIM 8805 -päällyste	18	Reunoille
Tiivispaperi + BIM 8805 -päällyste	34	Reunoille
Dispersiopäällystetty paperi	-	-

MG-paperin päävinnissä rata repesi helposti aiheutuneiden sivuttaisten vetojen vuoksi. Taittolaatikon reunat puhkaisivat materiaalin useasti ajon aikana, vaikka taittolaatikko oli varustettu pyörivillä laakereilla. Tiivispaperin ajettavuus oli parempi kuin MG-paperin. Tiivispaperia käytettäessä pakkauskoneella saavutettiin noin 10 kpl/min ajonopeus. Taloudellisesti kannattava ajonopeus olisi noin 30 kpl/min. Kumpaakaan materiaalia ei saatu saumautumaan koeajossa. Käytettyä saumauslämpötilaa vaihdeltiin 170-230 °C välillä. Tämän perusteella voidaan olettaa, että materiaalien päällystemäärä ei ole ollut riittävä saumautuvuuden saavuttamiseksi.

Dispersiopäällystetty paperi kesti pakkauskoneen siihen kohdistamaa vetoa, mutta pohjapaperin korkeasta neliömassasta (90 g/m²) johtuvan suuren jäykkyyden vuoksi paperi repesi taittolaatikolla. Rata saatiin saumautumaan hyvin 190 °C saumauslämpötilassa.

Koeajon perusteella voidaan päätellä, että käytetty pakkauskone tulisi varustaa vetoa tasoittavilla apuvetoteloilla sekä pehmeämmin taittavalla taittolaatikolla, jotta kone soveltuisi paperiradan käyttämiseen pakkausmateriaalina.

Pakkaukseen käytettävän paperimateriaalin optimaalisen neliömassan voidaan olettaa olevan noin 60-80 g/m² välillä. Tavoitteena on tasapaino riittävän korkean lujuuden ja liian korkean jäykkyyden välillä.

Käytetty päällyste 2 voisi soveltua käyttöön, jos sitä saadaan annosteltua riittävä määrä. Dispersiopäällystetyssä paperissa käytetty päällyste soveltuu käyttöön sellaisenaan.

12 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Taulukossa 14 on esitetty kaikki tutkitut materiaalit ja arvioitu niiden soveltuvuutta suunniteltuun käyttöön. Parhaiten konseptiin soveltuvat materiaalit ovat MG-paperi ja tiivispaperi. Tutkimuksessa käytettyjen paperien lujuudet olivat käytetylle pakkauskoneelle pääsääntöisesti liian pieniä. Lujuuksia voidaan lisätä helpoiten käyttämällä paperia, jonka neliömassa on suurempi. MG-paperia on saatavilla noin 10 g/m² alueella 35-90 g/m². Käytetty tiivispaperi on neliömassaltaan (57 g/m²) painavinta saatavilla olevaa. Paperin lujuuksia voidaan kasvattaa myös muuttamalla paperin massakoostumusta. Tehtiin tiivispaperin muutos joko lisäämällä neliömassaa tai muuttamalla koostumusta, muutos vaatii uuden paperilajin kehittämisen, mikä vie aikaa ja rahaa. Dispersiopäällystetyssä paperissa käytetty pohjapaperi oli korkean neliömassansa (90 g/m²) liian jäykkää käytettyyn pakkauskoneeseen. Tämän perusteella voidaan päätellä, että tasapaino riittävän lujuuden ja liian suuren jäykkyyden välillä on neliömassojen 60-80 g/m² alueella.

Tiivispaperin hyvien barrierominaisuuksien vuoksi sen kehittämistä suunniteltuun käyttötarkoitukseen kannattaa jatkaa. Paremmin paperiratojen ajamiseen soveltuvalla pakkauskoneella sen ajettavuus voi olla riittävän hyvä. Käytettyyn pakkauskoneeseen on tehtävä muutoksia, jotta paperiratojen ajettavuus voitaisiin nostaa taloudellisesti kannattavalle tasolle. Pakkauskoneen valmistajan ilmoituksen mukaan tarvittavien muutosten kustannukset olisivat noin 15-17 000 euroa.

Taulukko 14. Tutkitut materiaalit ja tarkastelua niiden soveltuvuudesta suunniteltuun käyttötarkoitukseen. Soveltuvuus-sarakkeessa plusmerkki tarkoittaa materiaalin soveltuvuuden kannalta positiivista ja miinusmerkki negatiivista ominaisuutta.

Materiaali	Havainnot	Soveltuvuus
PET-muovi	Ohuuden vuoksi materiaalin tuntuma ja ulkonäkö eivät ole tarpeeksi laadukkaita.	-
	Rei'itys estää materiaalin painamisen.	-
	Materiaalia voi käyttää pakkauksen ikkunana.	+
	Materiaali ei ole kierrätettävä tai kompostoitava.	-
Sellofaani	Materiaalin lujuus heikkenee liian paljon paistamisen aikana.	-
	Materiaali kestää huonosti pakastamista.	-
	Materiaali on biohajoavaa.	+
Tiivispaperi	Materiaalin lujuus ei heikkene merkittävästi paistamisen aikana.	+
	Materiaalilla on korkea rasvabarrier.	+
	Materiaali on liian heikkoa ajettavaksi pakkauskoneessa.	-
	Materiaalia ei ole saatavissa lujempuna.	-
	Materiaali voidaan kierrättää tai kompostoida.	+
MG-paperi	Materiaalin lujuus ei heikkene merkittävästi paistamisen aikana.	+
	Päällystämättömän materiaalin rasvabarrier on matala.	-
	Materiaali on liian heikkoa ajettavaksi pakkauskoneessa.	-
	Materiaalia on saatavissa korkeammalla neliömassalla.	+
	Materiaali voidaan kierrättää tai kompostoida.	+
Dispersiopäällystetty paperi	Materiaali kestää korkeita lämpötiloja hyvin.	+
	Materiaalin barrierominaisuudet ovat hyvät.	+
	Materiaali on liian jäykkää ajettavaksi pakkauskoneessa.	-
	Materiaalia on saatavissa matalammalla neliömassalla.	+
	Materiaali voidaan kierrättää tai kompostoida.	+
PET-paperi laminaatti	Materiaalin rakenne hajoaa paistamisen aikana.	-
	Materiaalista valmistetun pakkauksen avattavuus on huono.	-
	Materiaali ei hengitä riittävästi paistamisen aikana.	-
	Materiaalin barrierominaisuudet ovat hyvät.	+
	Materiaalia ei voi kompostoida.	-

Taulukossa 15 on esitetty kaikki tutkitut kuumasaumauspäällysteet ja arvioitu niiden soveltuvuutta suunniteltuun käyttöön. Parhaiten suunniteltuun käyttöön soveltuva kuumasaumauspäällyste on dispersiopäällystetyssä paperissa käytetty päällyste. Sen saumautuu normaaleissa saumauslämpötiloissa ja saumojen todettiin pysyvän kiinni myös korkeissa lämpötiloissa. Toisena vaihtoehtona koeajoissa käytetty BIM 8805 -kuumasaumauspäällyste ei sovellu suunniteltuun käyttöön pienestä kuiva-ainepitoisuudesta johtuvan huonon painokoneajettavuuden vuoksi. Kuiva-ainepitoisuutta ei voida lisätä heikentämättä dispersion stabiilisuutta. Kuumasaumauspäällysteen valmistaja on ilmoittanut, että he ovat kehittämässä korvaavaa päällystettä, jonka kuiva-ainepitoisuus olisi korkeampi.

Taulukko 15. Tutkitut kuumasaumauspäällysteet ja tarkastelua niiden soveltuvuudesta suunniteltuun käyttötarkoitukseen. Soveltuvuus-sarakkeessa plusmerkki tarkoittaa materiaalin soveltuvuuden kannalta positiivista ja miinusmerkki negatiivista ominaisuutta.

Materiaali	Havaintoja	Soveltuvuus
Päällyste 1	Päällyste saumautuu normaaleissa saumauslämpötiloissa.	+
	Sauma pysyy kiinni paistettaessa.	+
	Päällysteestä muodostuu hajua paistettaessa.	-
Päällyste 2	Päällyste saumautuu normaaleissa saumauslämpötiloissa.	+
	Sauma pysyy kiinni paistettaessa.	+
	Päällysteestä ei muodostu hajua paistettaessa.	+
	Päällysteen ajettavuus painokoneella on huono.	-
	Päällysteen kuiva-ainepitoisuus on liian pieni.	-
Päällyste 3	Päällyste saumautuu normaaleissa saumauslämpötiloissa.	+
	Päällyste ei pysy kiinni paistettaessa.	-
	Päällysteestä ei muodostu hajua paistettaessa.	+
Dispersiopäällystetyssä paperissa käytetty päällyste	Päällyste saumautuu normaaleissa saumauslämpötiloissa.	+
	Sauma pysyy kiinni paistettaessa.	+
	Päällysteestä ei muodostu hajua paistettaessa.	+

Myös PET-paperi -laminaatti voi soveltua suunniteltuun käyttöön, jos pystytään löytämään sopiva laminointiliima ja ratkaisemaan pakkauksen avattavuuteen ja hengittävyysliittymien liittyvät ongelmat. Laminaatti ei kuitenkaan ole ympäristön kannalta yhtä edullinen kuin dispersiopohjaiseen päällysteeseen perustuvat rat-

kaisut, koska suuri osa siitä on kierrätykseen tai kompostointiin kelpaamatonta, minkä vuoksi se tulee hävittää energijätteenä. Dispersiopohjaiseen päällystykseen perustuvat materiaalit voidaan joko kierrättää, kompostoida tai polttaa.

Pakkauksessa olisi hyvä olla ikkuna, josta voitaisiin tarkkailla tuotetta paistamisen aikana ja josta asiakas näkisi, millainen tuote pakkauksessa on. Ikkunamateriaaliksi voisi sopia tutkimuksessa käytetty rei'itetty PET-muovi, jonka reiät tehostaisivat höyryn poistumista paistamisen aikana. PET-muovin käyttö kuitenkin haittaa materiaalin kierrätettävyyttä ja estää kokonaan materiaalin kompostoinnin. Biohajoava sellofaani toimisi myös pakkauksen ikkunana, mutta sellofaanin haurastuminen paistamisen aikana voi heikentää pakkauksen laatuvaikutelmaa liian paljon. Lisäksi sellofaani ei kestä kunnolla pakastamista, joka on olennainen osa suunniteltua konseptia.

Tutkimustulosten perusteella voidaan todeta, että suunniteltuun konseptiin sopivaa uuninkestävää pakkausmateriaalia ei tämän työn puitteissa ehditty kehittämään valmiiksi. Ajatusta uuninkestävästä pakkausmateriaalista ei kuitenkaan voida hylätä, koska tutkimuksessa on selvinnyt, että markkinoilla on saatavilla materiaaleja, joilla on tähän käyttöön soveltuvat ominaisuudet. Tämän työn aikana ominaisuuksia ei kuitenkaan saatu yhdistettyä, mikä vaatii kehitystyön jatkamista.

13 JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSET

13.1 Kustannukset

Koska suunnitellussa konseptissa toimivan materiaaliyhdistelmän kehitystyö on vielä kesken, materiaalien kustannuksia tulee arvioida erikseen. Tavoitteena on selvittää materiaalien kustannukset jalostettuna ja painettuna pakkausta kohden, jolloin voidaan vertailla mahdollisia vaihtoehtoisia ratkaisuja sekä arvioida suunnitellun pakkauskonseptin käyttämisen kannattavuutta.

13.2 Elintarvikekelpoisuus

Ennen käyttöä elintarvikkeiden pakkaamiseen materiaalit tulee tutkia elintarvikekelpoisuuden varmistamiseksi. Huolellinen tutkiminen on tarpeen, koska materiaalit kulkevat monivaiheisen, korkeita ja matalia lämpötiloja sisältävän logistiikkaketjun läpi. Erityisesti korkeissa lämpötiloissa materiaaleissa tapahtuvien kemiallisten ja fysikaalisten reaktioiden todennäköisyys kasvaa. Reaktioiden tuloksena voi syntyä ihmiselle haitallisia yhdisteitä, jotka siirtyvät pakkausmateriaalista tuotteeseen.

Koska tuotteiden paistamiseen käytettyjen uunien lämpötilaa ei voida säätää kovin tarkasti, elintarvikekelpoisuustestaus tulisi suorittaa varmuuden vuoksi hieman suunniteltua korkeammassa lämpötilassa. Korkeissa lämpötiloissa pienikin lämpötilan nousu voi nopeuttaa haitallisten aineiden muodostumisreaktioita merkittävästi. Sopiva testauslämpötila voisi 220 °C lämpötilaan tarkoitetulle pakkaukselle olla esimerkiksi 230 °C. Varmuusmarginaali on riippuvainen käytettyjen uunien lämpötilan säädön tarkkuudesta ja voi olla pienempi, jos käytössä on sellaisia uuneja, joiden lämpötila voidaan säätää tarkasti.

13.3 Aika-lämpötilaindikaattorit

Tällä hetkellä aika-lämpötilaindikaattoreita käytetään herkästi pilaantuvien tuotteiden pakkauksissa kylmäketjun seurantaan. Indikaattori ilmoittaa, jos kylmäketju on katkennut jossain logistiikkaketjun vaiheessa. Aika-

lämpötilaindikaattoreita voidaan myös käyttää esimerkiksi ilmoittamaan virvoitusjuoman olevan sopivan kylmää ja valmis nautittavaksi.

Yleisesti käytössä olevista aika-lämpötilaindikaattoreista ei ole saatavilla korkeisiin, yli 200 °C lämpötiloihin. Tällainen korkean lämpötilan indikaattori olisi hyödyllinen suunnitellussa konseptissa. Pakattua tuotetta ei voida paistaa silmämääräisesti, koska mahdollisesta ikkunasta huolimatta tuotteen tarkkailu pakkauksen sisällä voi olla vaikeaa. Paistamisen aikana indikaattori voisi ilmaista, koska tuote on ollut uunissa riittävän pitkän ajan. Tuotteesta saadaan kypsä mahdollisesta tavoitetta alhaisemmasta paistolämpötilasta huolimatta, koska indikaattori ottaisi alhaisemman lämpötilan huomioon lisäten paistoaikaa.

Pelkkää lämpötilaindikaattoria voitaisiin käyttää pakkaukseen kohdistuneen maksimilämpötilan tarkkailuun. Koska pakkauksen elintarvikekelpoisuus on testattu tietyissä olosuhteissa, erityisesti lämpötilassa, pakkausta käyttötilanteessa tutkimusolosuhteet eivät saa ylittyä. Lämpötilaindikaattori voisi kertoa pakkauksen käyttäjälle turvallisen lämpötilan ylittyneen ja tuotteen olevan kelpaamaton nautittavaksi.

Pakkauksessa käytettävä indikaattori olisi helpoimmin toteutettavissa painettavana, jolloin indikaattori voitaisiin asettaa pakkaukseen painamisen yhteydessä. Indikaattorin toimiminen edellyttää tietyssä lämpötilassa tietyn ajan kuluttua tapahtuvaa kemiallista reaktiota, jonka seurauksena syntyy esimerkiksi värillistä lopputuotetta. Reaktion lopputuotteen tulee täyttää samat elintarvikekelpoisuusvaatimukset kuin muut pakkauksen materiaalit. Lämpötilaindikaattorissa tapahtuvan reaktion tulisi tapahtua nopeasti rajalämpötilan ylityttyä. Jos pakkausmateriaaleista syntyvien haitallisten yhdisteiden muodostumisreaktio on hidas, voidaan lämpötilaindikaattori asettaa hyväksymään lyhytaikainen rajalämpötilan ylitys.

Tällainen elintarvikeeturvallinen aika-lämpötilaindikaattorin tai lämpötilaindikaattorin voisi perustua samoihin reaktioihin, kuin paistettavien elintarvikkeiden vä-

rinmuutokset. Niissä tuotteiden pinta tummuu tuotteissa olevien orgaanisten yhdisteiden hajoamisen seurauksena. Samaa periaatetta käyttäen pakkauksen pintaan voitaisiin painaa esimerkiksi hiilihydraattia tai proteiinia, joka olisi normaalissa lämpötilassa väritöntä, mutta tummuisi paistettaessa. Reaktiolämpötila voitaisiin säätää valitsemalla sopiva aineyhdistelmä ja värin tummuutta seoksen konsentraatiolla.

13.4 Uunitekniikan kehitys

Leipomotuotteiden paistamiseen käytettyjen uunien lämpötilansäätö tapahtuu tavallisesti yksinkertaisen termostaatin ohjaamana. Koska termostaatti voi säätää lämpötilaa vain kytkemällä lämmitysvirran päälle tai pois, lämpötilan säätäminen ei ole kovin tarkkaa. Lisäksi uunin lämpötila vaihtelee asetusarvon molemmin puolin amplitudilla, joka on riippuvainen lämmityslaitteen tehosta ja termostaatin herkkyydestä. Erityisesti kylmää uunia lämmitettäessä uunin lämpötila voi kohota huomattavasti asetusarvoa korkeammalle ennen asettumistaan normaaliin vaihteluun.

Perinteisten leipomotuotteiden paistamisessa termostaattisäätöinen uuni ei aiheuta ongelmia, koska tuotteet paistetaan tavallisesti silmämääräisesti annettujen paistolämpötilojen ja -aikojen ollessa vain suosituksia. Pakattujen tuotteiden paistamisessa tuotteet pitäisi paistaa annettuja paistolämpötiloja ja -aikoja noudattaen sekä oikean kypsymisen että pakkausmateriaalien rajallisen korkean lämpötilan keston vuoksi. Annettujen lämpötilojen ja aikojen noudattaminen on kuitenkin hankalaa, koska uunien lämpötiloja ei voida säätää tarkasti.

Tämän ongelman voisi ratkaista joko edellisessä osassa esitellyllä aika-lämpötilaindikaattorilla tai sellaisella uunilla, jonka lämpötilan säätäminen olisi tarkempaa. Lämpötilan säätäminen voitaisiin hoitaa termostaatin sijaan PID-säätimellä, joka säätäisi uunin lämmitysvastusten jännitettä. PID-säätimellä uunin lämpötila saataisiin pysymään lähempänä asetusarvoa paistamisen aikana.

PID-säätimet ovat teollisuudessa yleisesti käytössä, jolloin niiden hinnan ei voisi kuvitella muodostuvan esteeksi.

13.5 Tuotteiden kuivuminen pakastuksen aikana

Vaihteleva pakastuslämpötila aiheuttaa vettä sisältävien elintarvikkeiden kuivumista pakastuksen aikana. Tämän vuoksi pakastetuotteet tulee pakata materiaaliin, jonka vesihöyrybarrier on riittävän suuri. Tällöin tuotteista sublimoituva vesi ei pääse poistumaan pakkauksesta ja päästämään tuotetta kuivumaan.

Suunnitellussa konseptissa tuotteet on tarkoitus paistaa myymäläleipomoissa ja paistopisteissä, joihin tuotteet toimitetaan muovipussilla vuoratussa pahvilaatikossa. Tuotteita on suunniteltu myös myytävän pakastettuna suoraan asiakkaalle, jolloin itse primääripakkauksen vesihöyrybarrierin tulee olla riittävän suuri. Paistamisvaihe vaatii kuitenkin pakkaukselta hengittävyttä, minkä vuoksi olisi selvitettävä, onko olemassa sellaista pakkausmateriaalin vesihöyrynläpäisevyyttä, joka olisi riittävän pieni säilyttämään tuotteen laatu pakastuksen aikana ja riittävän suuri poistamaan vesihöyry paistettaessa.

Ongelma voitaisiin myös ratkaista esimerkiksi pakkauksessa olevalla venttiilillä, joka päästäisi ylimääräisen paineen purkautumaan. Yksinkertainen ratkaisu olisi, että kuluttaja leikkaisi pakkauksen auki ennen paistamista, mikä vaatii hieman vaivannäköä. Lisäksi vain yhdestä kohtaa auki olevasta pakkauksesta vesihöyry ei pääse poistumaan tasaisesti, mikä voi johtaa tuotteen epätasaiseen kypsymiseen.

13.6 Irrokeominaisuuksien lisääminen silikonilla

Kosteat ja rasvaiset tuotteet voivat paistamisen aikana tarttua kiinni pakkausmateriaaliin. Samasta syystä leivinpaperissa käytetään silikonilla parantamaan irrokeominaisuuksia ja estämään tuotteiden tarttuminen kiinni paperiin. Silikonin hyvät irrokeominaisuudet perustuvat sen matalaan kriittiseen pintajännitykseen, mikä estää useimpia nesteitä kastelemasta sen pintaa.

Hyvien irrokeominaisuuksien vuoksi suunnitellussa konseptissa ei voida käyttää kauttaaltaan silikonoitua materiaalia, koska levitettävä saumauspäällyste ei myöskään tartu siihen. Tämän vuoksi silikonointi voitaisiin suorittaa kohdistetusti niihin kohtiin pakkausmateriaalia, jotka tulevat kosketuksiin tuotteen kanssa. Jos pakkausmateriaali vaatii parempia barrierominaisuuksia, silikonointi voidaan tehdä kuumasaumautuvan barrierpäällysteen päälle.

13.7 Tiivispaperi-paperi -laminaatti

Uuninkestävään pakkaukseen voisi soveltua dispersiopäällystetty tiivispaperi-paperi -laminaatti, jolla saataisiin yhdistettyä eri materiaalien parhaat ominaisuudet. Normaalin kraft-paperi toimisi materiaalin ulkopintana ja sen tehtävänä olisi tuoda rakenteeseen lujuutta ja siten mahdollistaa pienineliömassaisen tiivispaperin käyttäminen. Lisäksi kraft-paperi antaa materiaalille hyvän painettavuuden. Sopiva kraft-paperin neliömassa voisi olla noin 40 g/m^2 . Tiivispaperin neliömassa voisi olla $30\text{-}40 \text{ g/m}^2$ ja sen tehtävänä olisi antaa laminaatille rasva-barrieria ja toimia vähähuokoisena pohjana dispersiopäällysteelle. Kuumasaumautuva dispersiopäällyste voitaisiin levittää laminaattiin kohdistetusti tai kauttaaltaan riippuen materiaalin vesihöyrynläpäisevyyden tarpeesta. Myös paperikerrosten välissä oleva laminointiliima voisi toimia barrierkerroksena.

14 PROJEKTIN HAASTEET

Projektin suorittamiseen liittyvät suurimmat haasteet olivat materiaaliominaisuuksien tavoitearvojen ja barrierominaisuuksien mittausten puuttuminen, materiaalien löytämisvaikeudet ja pitkät toimitusajat, painoväriin ominaistietojen vaikea saatavuus sekä ennalta määrätyn pakkauskoneen soveltumattomuus kuitumateriaalien ajamiseen.

Materiaalin ominaisuuksia tutkittaessa ominaisuuksille ei ollut määritettävissä yksiselitteisiä tavoitearvoja, minkä vuoksi päätelmiä jouduttiin tekemään arvioiden perusteella. Tarkkojen tavoitearvojen määrittäminen olisi kuitenkin vaatinut runsaasti aikaa, mikä olisi hidastanut projektin etenemistä.

Materiaalien ominaisuuksien tutkimista haittasi erityisesti barrierominaisuuksien, kuten vesihöyrynläpäisevyyden, rasvanläpäisevyyden ja hapenläpäisevyyden mittaamiseen soveltuvan laitteiston puuttuminen. Barrierominaisuuksia jouduttiin arvioimaan ilmanläpäisevyydestä saadun tutkimustiedon perusteella. Ilmanläpäisevyys ei anna todenmukaista kuvaa kuitumateriaalin vesihöyrynläpäisevyydestä vesimolekyylien monimutkaisemman läpäisymekanismin vuoksi.

Olennainen osa projektia oli saatavilla olevien materiaalien löytäminen. Erityisesti soveltuvien kuumasauuspäällysteiden löytäminen oli hankalaa ja vaati yhteistyökumppaneiden laajojen kontaktiverkostoiden käyttämistä. Löytämistä hankaloitti kuumasauuspäällysteeltä vaaditut korkeat lämmönkestominaisuudet, joita tavallisesti käytössä olevat kuumasauuspäällysteet eivät täytä.

Koeajomateriaalien pitkät toimitusajat aiheuttivat omat haasteensa projektiin, koska tiukan aikataulun vuoksi osa materiaaleista jouduttiin tilaamaan koeajokäyttöä varten jo hyvissä ajoin, vaikka niiden ominaisuuksien riittävydestä suunniteltuun käyttötarkoitukseen ei ollut varmaa tietoa. Suurin syy tähän on pienten tilauserien vaikea mahduttaminen materiaalivalmistajien normaaleihin

ajojärjestyksiin taloudellisesti. Tästä johtuvan hitauden vuoksi pienet koe-erät jäävät normaalin tuotannon jalkoihin ja koerullien toimitusaika venyy pitkäksi.

Painatus on olennainen osa pakkausta. Tässä pakkauskonseptissa käytettävien painovärien tulee kestää sekä matalia että korkeita lämpötiloja värin tai rakenteen muuttumatta. Tietoa painovärien lämmönkestävyydestä ja siihen vaikuttavista asioista on kuitenkin niukasti saatavilla, minkä vuoksi projektissa on jouduttu tyytymään painoväriinvalmistajan suositteluun väriin ja luottamaan sen lämmönkesto-ominaisuuksiin.

Merkittävin projektin onnistumista haitannut seikka oli pakkauskoneen heikko soveltuminen kuitumateriaalien ajamiseen. Käytetyn pakkauskoneen käyttö suunnitellussa konseptissa oli kuitenkin ennalta määrätty, minkä vuoksi asiaan ei voitu vaikuttaa projektin aikana. Käytetty pakkauskone tulee varustella lisälaitteilla, jotka mahdollistavat paperiratojen ajamisen ja jotka aiheuttavat kustannuksia. Kustannuksien kohdistamista hankaloittaa se, että käytetyn koneen omistaa alihankkija.

LÄHTEET

1. Ahvenainen, R. Elintarvikkeiden pakkaaminen. Pakkaaminen - perustiedot pakkauksista ja pakkaamisesta. Toim. Järvi-Kääriäinen, T. & Leppänen-Turkula, A. Opetushallitus. Helsinki 2002. s. 44-52.
2. Järvinen, A. J. Kuivien elintarvikepakkausten suojausominaisuudet. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Puunjalostustekniikan osasto. Espoo 2005. 99 s.
3. Kimpimäki, T. Dispersion coating and product applications. Savolainen, A. Paper and Paperboard Converting [CD-ROM]. Versio 1.0. Fapet Oy. Helsinki 1998. Luku 5.
4. Paine, F. A. & Paine, H. Y. A Handbook of Food Packaging. Blackie & Son Ltd. Glasgow, Iso-Britannia 1983. 394 s.
5. Soroka, W. Fundamentals of Packaging Technology. The Institute of Packaging. Iso-Britannia 1995. 464 s.
6. Andersson, C., Ernstsson, M. & Järnström, L. Barrier Properties and Heat Sealability/failure Mechanisms of Dispersion-coated Paperboard. Packaging technology and Science. 2002:15. s. 209-224.
7. Kajanto, I., Laamanen, J. & Kainulainen, M. Paper bulk and surface. Niskanen, K. Paper Physics [CD-ROM]. Versio 1.0. Fapet Oy. Helsinki 1998. Luku 3.
8. Kjellgren, H. Barrier properties of greaseproof paper. Lisensiaatintyö. Karlstad University. Department of Chemical Engineering. Karlstad 2005. 44 s.
9. Leskelä, M. & Simula, S. Transport phenomena. Niskanen, K. Paper Physics [CD-ROM]. Versio 1.0. Fapet Oy. Helsinki 1998. Luku 9.

10. Gällstedt, M. & Hedenqvist, M. S. Packaging-Related Properties of Alkyd-Coated, Wax-Coated and Buffered Chitosan and Whey Protein Films. *J. Appl. Polymer Sci.* 91(2004):1. s. 60-67.
11. Hedenqvist, M. & Gedde, U. W. Diffusion of Small-Molecule Penetrants in Semicrystalline Polymers. *Prog. Polym. Sci.* 21(1996):2. s. 299-333.
12. Larsen, H. Oxygen Transmission Rates of Packages at Ambient, Chill and Freezing Temperatures Measured by the AOIR Method. *Packag. Technol. Sci.* 17(2004):4. s. 187-192.
13. McGinnis, G. D. & Shafizadeh, F. Cellulose and Hemicellulose. *Pulp and Paper Chemistry and Chemical Technology*. 3. painos. Toim. Casey, J. P. Julk. John Wiley & Sons, Inc. Yhdysvallat 1980. s. 1-38.
14. Bøhmer, E. Thermal Properties. *Handbook of Physical testing of Paper*. Toim. Borch, J., Lyne, M. B., Mark, R. E. & Habberger, C. C. Jr. Marcel Dekker, Inc. Yhdysvallat 2002. s. 389-427.
15. Forsskåhl, I., Korhonen, T. & Tylli, H. Heat-induced changes in fibre surfaces. *Cellulosic pulps, fibres and materials*. Toim. Kennedy, J. F., Phillips, G. O., Williams, P. A. & Lönnberg, B. Julk. Woodhead Publishing Ltd. Iso-Britannia 2000. s. 197-203.
16. Lorås, V. Bleaching. *Pulp and Paper Chemistry and Chemical Technology*. 3. painos. Toim. Casey, J. P. Julk. John Wiley & Sons, Inc. Yhdysvallat 1980. s. 633-764.
17. Rowell, R. M. & LeVan-Green, S. L. Thermal Properties. *Handbook of wood chemistry and wood composites*. Toim. Rowell, R. M. CRC Press. Yhdysvallat 2005. s. 121-138.

18. Szcześniak, L., Rachocki, A. & Tritt-Goc, J. Glass transition temperature and thermal decomposition of cellulose powder. *Cellulose*. 15(2008):3. s. 445-451.
19. Aurela, B., Vuorimaa, M. & Lindell, H. Migration from ovenable boards at high temperatures. *Nord. Pulp Pap. Res. J.* 15(2000):2. s. 150-154.
20. Kurri, V., Malén, T., Sandell, R. & Virtanen, M. *Muovitekniikan perusteet*. 3. painos. Opetushallitus. Helsinki 2002. 244 s.
21. Petrie, E. M. *Handbook of adhesives and sealants*. 2. painos. The McGraw-Hill Companies, Inc. Yhdysvallat 2007. 1048 s.
22. Kostamo, P. & Hallikainen, A. *Elintarvikkeen kanssa kosketukseen joutuvat tarvikkeet - vaatimukset ja valvontavelvoitteet*. Elintarvikevirasto. Helsinki 2004. 42 s.
23. Kirwan, M. J. *Paper-based flexible packaging. Paper and paperboard packaging technology*. Toim. Kirwan, M. J. Blackwell Publishing Ltd. Intia 2005. s. 84-115.
24. Lankinen, K., Saariluoma, P., Hanén, J., Pikkarainen, K. & Järvi-Kääriäinen, T. *Pakkauspainomenetelmät ja merkitseminen. Pakkaaminen - perustiedot pakkauksista ja pakkaamisesta*. Toim. Järvi-Kääriäinen, T. & Leppänen-Turkula, A. Opetushallitus. Helsinki 2002. s. 112-123.
25. Oittinen, P. & Saarelma, H. *Printing inks*. Oittinen, P. & Saarelma, H. *Printing* [CD-ROM]. Versio 1.0. Fapet Oy. Helsinki 1998. Luku 9.
26. Jokiahho, K., Ohra-aho, T., Pitkänen, M., Aurela, B., Ollila, M. & Järvi-Kääriäinen, T. *Ohjeita painovärien käyttäjille - elintarvikepakkaukset. Pakkaustutkimus - PTR ry*. Helsinki 2009. 15 s.

27. Järvi-Kääriäinen, T. Pakkauskoneet ja -laitteet. Pakkaaminen - perustiedot pakkauksista ja pakkaamisesta. Toim. Järvi-Kääriäinen, T. & Leppänen-Turkula, A. Opetushallitus. Helsinki 2002. s. 78-97.
28. Vähä-Nissi, M. & Kuusipalo, J. Wetting and adhesion in paper and paperboard converting. Savolainen, A. Paper and Paperboard Converting [CD-ROM]. Versio 1.0. Fapet Oy. Helsinki 1998. Luku 3.
29. Olof, N., Steiffner, E., Dickson, R. & LePoutre, P. Mechanical interlocking in coated paper. Nord. Pulp Pap. Res. J. 10(1995):1. s. 80-82.
30. Kirwan, M. J. Paper and paperboard - raw materials, processing and properties. Paper and paperboard packaging technology. Toim. Kirwan, M. J. Blackwell Publishing Ltd. Intia 2005. s. 1-49.
31. Stehle, G. Lebensmittel verpacken. Milchwirtschaftlicher Fachverlag GmbH. Saksa 1989. 519 s.
32. Ashley, R. J., Cochran, M. A. & Allen, K. W. Adhesives in packaging. Int. J. Adhesion and Adhesives. 15(1995):2. s. 101-108.
33. Dersch, J. A. Bakery Ovens. Bakery Technology and Engineering. Toim. Matz, S. A. The Avi Publishing Company, Inc. Yhdysvallat 1960. s. 479-516.
34. Leppänen-Turkula, A. Converted paper and paperboard as packaging materials. Savolainen, A. Paper and Paperboard Converting [CD-ROM]. Versio 1.0. Fapet Oy. Helsinki 1998. Luku 10.
35. Kirwan, M. J. Environmental and waste management issues. Paper and paperboard packaging technology. Toim. Kirwan, M. J. Blackwell Publishing Ltd. Intia 2005. s. 50-83.

36. Vikman, M. Pakkausmateriaalien biohajoavuus ja kompostoitavuus. Pakkaaminen - perustiedot pakkauksista ja pakkaamisesta. Toim. Järvi-Kääriäinen, T. & Leppänen-Turkula, A. Opetushallitus. Helsinki 2002. s. 208.
37. Retulainen, E., Niskanen, K. & Nilsen, N. Fibers and bonds. Niskanen, K. Paper Physics [CD-ROM]. Versio 1.0. Fapet Oy. Helsinki 1998. Luku 2.
38. Niskanen, K. Rheology and moisture effects. Niskanen, K. Paper Physics [CD-ROM]. Versio 1.0. Fapet Oy. Helsinki 1998. Luku 8.
39. Twede, D. & Goddard, R. Packaging Materials. 2. painos. Pira International. Iso-Britannia 1998. 230 s.
40. Karhuketo, H. & Järvi-Kääriäinen, T. Joustopakkausmateriaalit. Pakkaaminen - perustiedot pakkauksista ja pakkaamisesta. Toim. Järvi-Kääriäinen, T. & Leppänen-Turkula, A. Opetushallitus. Helsinki 2002. s. 156-164.
41. Vähä-Nissi, M., Kuusipalo, J. & Savolainen A. Coated greaseproof paper as barrier material. Pap. Puu. 83(2001):2. s. 138-141.
42. Vähä-Nissi, M., Savolainen, A., Talja, M. & Möro, R. Dispersion barrier coating of high-density base papers. Tappi J. 81(1998):11. s. 165-173.
43. Kjellgren, H., Stolpe, L. & Engström, G. Oxygen permeability of polyethylene-extrusion-coated greaseproof paper. Nord. Pulp Pap. Res. J. 23(2008):3. s. 272-276.
44. Kuusipalo, J. & Taipale, J. Coating and lamination and product applications. Savolainen, A. Paper and Paperboard Converting [CD-ROM]. Versio 1.0. Fapet Oy. Helsinki 1998. Luku 7.

45. Record Packaging. Record Packaging internetsivut [online]. 2008 [viitattu 9.11.2009]. Record Packaging Jaguar Flow Wrapper. Saatavissa: <http://www.recordpackaging.com/Machine/Jaguar-Flow-Wrapper.aspx>.
46. Keskinen, K. I. Kemian laitetekniikan taulukoita ja piirroksia. 11. painos. Otatieto. Helsinki 2006. 76 s.

PKP-09

Aalto-yliopisto
Teknillinen korkeakoulu
Puunjalostustekniikan kirjasto